

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

---

*Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií*

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a Informatika

Studijní obor: 1802R022 – Informatika a logistika

## **Navrhnutí měřicího řetězce a vytvoření měřicí aplikace pro sběr dat z Podzemního výukového střediska Josef**

## **Design of a measurement chain and development of a measurement application for data acquisition for the Underground education facility Josef**

Bakalářská práce

Autor: Michal Vittek

Vedoucí práce: Ing. Petr Hošek

Konzultant: doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.

V Liberci 20. května 2011

## **Originál zadání**

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum            20. května 2011

Podpis

## **Abstrakt**

Cílem bakalářské práce je navrhnout a realizovat možný přístup při měření tepelných vlastností hornin. Práce poskytuje ucelený přehled typů čidel použitelných pro kontaktní měření teploty, jejich výhody a nevýhody. Dále je navržen celý měřicí řetězec, sestávající z čidla, měřicího modulu a měřicí aplikace. Z hlediska softwaru je pak popsáno vývojové prostředí Labview, ve kterém byla vytvořena aplikace METEH. Jsou zde rozebrány funkce této aplikace, je popsán kód a použité programátorské přístupy jako stavový automat či fronta. Aplikace a měřicí řetězec jsou poté ověřeny praktickými pokusy v podzemním výukovém středisku Josef, čímž je možné posoudit vhodnost zvoleného řešení. Tyto experimenty jsou zde tedy popsány a diskutovány.

The aim of this Bachelor thesis is to propose and implement a possible approach to the measurement of rock temperature attributes. There is a comprehensive overview of the types of sensors for measuring contact temperature, their benefits and disadvantages. Measurement chain is designed, consisting of a sensor, a measurement card and the measurement application. Next, Labview development environment in which the application METEH was created is described. The functions of this application are analyzed and its code and programming approaches that were used, such as the state machine or the queue, are described here. The application and measurement chain are then verified by the experiments in the underground educational facility Josef, which makes it possible to assess the suitability of the chosen solution. These experiments are described and discussed here.

## **Klíčová slova**

Labview

METEH

Stavový automat

Měření teploty hornin

# Obsah

Prohlášení.....	3
Abstrakt .....	4
Klíčová slova .....	4
Seznam zkratek a termínů.....	7
Úvod .....	8
1 Měření teploty hornin .....	9
1.1 Měření tepelných vlastností hornin .....	9
1.2 Štola Josef.....	9
1.3 Metodika měření prostupu tepla skálou.....	10
1.4 Senzory vhodné pro měření teploty hornin .....	11
1.4.1 Termočlánky .....	11
1.4.2 Termistory .....	12
1.4.3 RTD – odporové teploměry .....	12
2 Měřicí řetězec - hardware .....	14
2.1 Výběr hardware.....	14
2.1.1 Měřicí karta .....	15
2.1.2 Čidlo.....	16
2.2 Sada driverů NI-DAQmx.....	16
3 Softwarové prostředky .....	17
3.1 Programovací prostředí Labview.....	17
3.1.1 Grafické programování.....	17
3.1.2 Sběr dat .....	18
3.2 Shift registry .....	18
3.3 Stavový automat.....	18
3.4 VI a subVI.....	20
4 Aplikace METEH.....	22
4.1 Grafický interface programu .....	22
4.1.1 Graf .....	22
4.1.2 Listbox s parametry měření.....	22
4.1.3 Menu na horní liště .....	23
4.2 Okno s nastavením parametrů měření .....	23
4.3 Popis fungování programu .....	24
4.4 Popis jednotlivých stavů hlavní Case struktury .....	25

5	Měření teploty v praxi - pokus ve škole Josef.....	28
5.1	Cíle měření .....	28
5.2	Příprava pokusu a podmínky .....	28
5.2.1	Geopolymer.....	28
5.2.2	Teoretická příprava .....	29
5.2.3	Praktická příprava.....	29
5.3	Průběh pokusu .....	30
5.3.1	První část experimentu.....	30
5.3.2	Druhá část experimentu .....	33
5.4	Závěry z praktického pokusu .....	33
	Závěr .....	36
	Seznam literatury .....	37
	Příloha A - vývojový diagram .....	38
	Příloha B – hierarchie VI .....	42
	Příloha C - VI a subVI použité v aplikaci.....	43
	Příloha D - shift registry programu.....	45

## Seznam zkratk a termínů

$\alpha$  – termoelektrický koeficient (1.4.1), případně koeficient prostupu tepla (5.4)

AD – analogově – digitální

CJC – cold junction compensation, kompenzace referenčního konce

ČVUT – České vysoké učení technické v Praze

DAQ – data acquisition

J, K, T, E – označení typu termočlánků

NI - firma National Instruments

NiDAQmx – driver od National Instruments pro obsluhu zařízení pro sběr dat

NTC - negastor

ODT – open thermocouple detection, detekce rozpojeného konce

PTC - pozistor

PXI - platforma pro měřicí moduly od NI

$q$  – hustota tepelného toku

RTD – odporové teplotní čidlo

SA – stavový automat

SCXI - platforma pro měřicí moduly od NI

$t'_1, t_1$  - teplota

UEF – underground educational facility

USB – univerzální sériová sběrnice

## Úvod

Existuje několik důvodů k měření tepelných vlastností hornin. Již delší dobu se rozmáhají tepelná čerpadla, která v principu získávají teplo z hlubinných vrtů. Výhledově se také u nás počítá s výstavbou úložiště podzemního jaderného paliva a je nutné dobře prostudovat chování hornin z ohledu prostupu tepla. V neposlední řadě probíhá výzkum vlastností takzvaných geopolymerů a jejich možného uplatnění pro skladování energie v zemi, což je předmětem druhé části praktického experimentu, který proběhl v UEF Josef.

Tato bakalářská práce si klade za cíl vystupovat jako určitá ukázka možností při kontaktním měření teploty hornin (běžné teploty hornin, nikoliv např. magmatu), a zároveň ukázat jeden z možných přístupů při tvorbě software pro tato měření.

V kapitole první se práce zabývá hlavními důvody a způsoby měření teplotních veličin v horninách, a dále pokusným pracovištěm UEF Josef. Druhá kapitola obsahuje hardwarové prostředky potřebné k realizaci celého měřicího řetězce - od výběru dodavatele až po specifikaci čidla a měřicího modulu. Třetí kapitola pojednává o vývojovém prostředí Labview, v němž byla realizována aplikace specializovaná na sběr a zpracování požadovaných dat, a o obecných postupech při této realizaci. Čtvrtá kapitola popisuje samotnou aplikaci METEH, vyvinutou v rámci bakalářské práce, popisuje její kód, funkce a možnosti. Poslední, pátá kapitola se zabývá praktickým pokusem s měřením prostupu tepla horninou a geopolymerem, provedeném ve štolě Josef za pomoci vybraného měřicího řetězce a vyvinuté aplikace METEH.

V samotném závěru je uvedeno zhodnocení výsledků měření a posouzení vhodnosti zvoleného řešení.



# 1 Měření teploty hornin

Tato kapitola se zabývá hlavními důvody a způsoby měření teplotních veličin v horninách, a dále pokusným pracovištěm UEF Josef.

## 1.1 Měření tepelných vlastností hornin

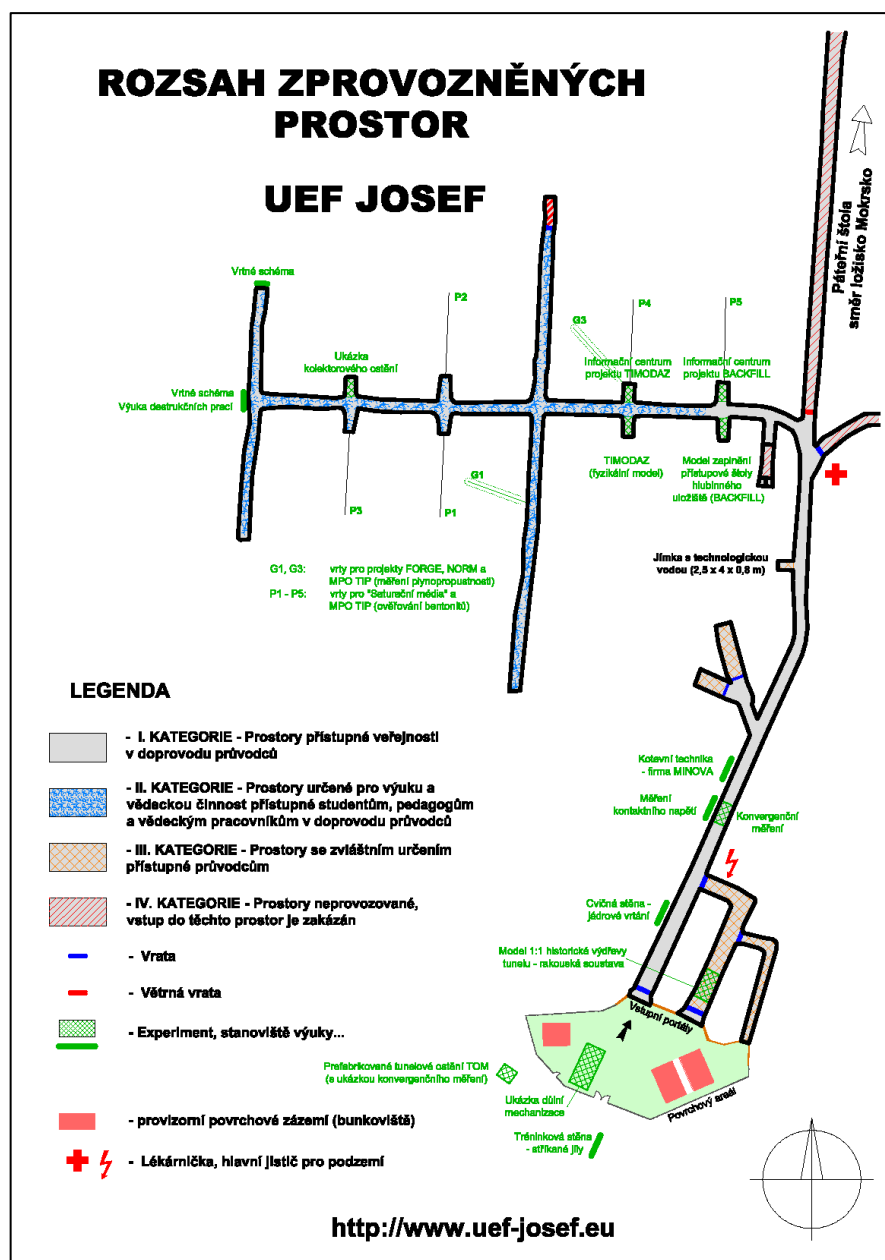
Z hlediska tepelných vlastností je možno horniny posuzovat jednak podle jejich tepelné kapacity, a jednak podle tepelné vodivosti. Hornina obecně je buďto heterogenní směs několika minerálů, nebo obsahuje pouze jeden minerál. Kromě kompaktní hmoty tvořené minerály, většinou ve formě tzv. horninových zrn, je v ní běžně obsažena také voda a vzduchové pukliny. Tepelná kapacita hornin je tedy součtem tepelných kapacit všech těchto horninových zrn, vody a vzduchu v puklinách. U tepelné a teplotní vodivosti však záleží také na uspořádání horninových zrn, tvaru a směru puklin a jejich vzájemném uspořádání. Může tedy být v každém směru v hornině jiná. Také se mírně mění v závislosti na nasycení pórů vodou, což závisí na podzemních pramenech vody a vlhkosti prostředí obecně.

## 1.2 Štola Josef

Pokusná měření pro tuto bakalářskou práci proběhla v Podzemním výukovém středisku Josef (UEF Josef), poblíž Slapské přehrady u obce Čelina na Příbramsku. Jde o pracoviště Stavební fakulty ČVUT, které je v rámci projektu Mezilab využíváno i jinými vysokými školami a jejich ústavy. Samotná zpřístupněná část štoly je pak součástí důlního díla Josef o celkové délce chodeb 7853 metrů při výšce nadloží 90 - 110 metrů. To bylo vyraženo v osmdesátých letech minulého století jako součást geologického průzkumu zlatorudného revíru Psí hory. Od roku 2006 slouží k výzkumným účelům pod patronátem ČVUT. V současné době je rekonstruována a užívána jen část chodeb (viz obr 1.1), ale do budoucna je plánováno zpřístupnění zbytku štoly a rekonstrukce zázemí.

V nedávné době proběhlo v UEF Josef několik dlouhodobých výzkumných experimentů podobného zaměření, včetně například TIMODAZ (zkoumání vlivu tepla na stabilitu ostění v úložných tunelech) nebo NORM (Využití celosvětově používaných norských klasifikací horninových masivů pro zvýšení kvality vstupních parametrů při návrhu monitorovacích systémů podzemního skladování a ukládání plynu).

Horninové prostředí zde tvoří především bazalty, andezity, ryolity, tufy a tufity vulkanického původu, pronikane mladšími granodiority a albitickými žulami. Je tedy dosti různorodé.



Obr 1.1: Zprovozněná část štoly Josef

Také zde probíhá výuka některých specializovaných předmětů vyučovaných na fakultě stavební ČVUT v Praze.

### 1.3 Metodika měření prostupu tepla skálou

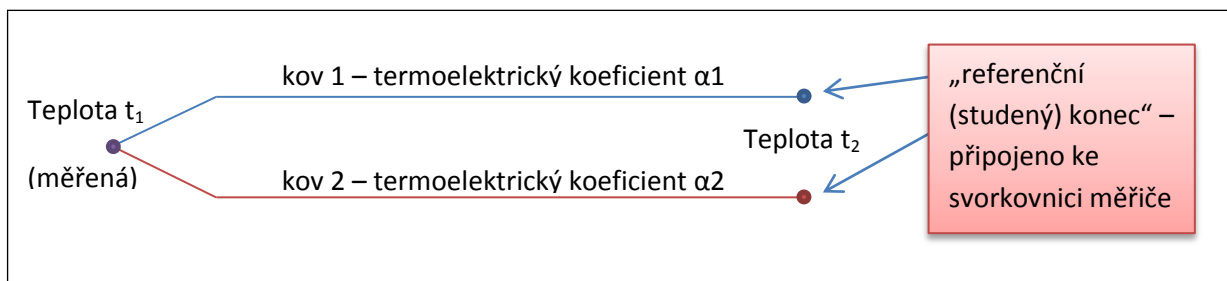
Prostup tepla horninami probíhá především vedením (kondukcí) tepla, na rozdíl od plyných a tekutých látek, kde se uplatňuje i proudění. Pokud je mezi dvěma oblastmi v pevné látce rozdíl teplot, pak se teplo šíří od svého zdroje rychlostí určenou tepelnou vodivostí materiálu látky, dokud nenastane ustálený stav. Přitom teplota v homogenním prostředí bude klesat se čtvercem vzdálenosti.

## 1.4 Senzory vhodné pro měření teploty hornin

Pro měření teploty hornin kontaktním způsobem přicházejí v úvahu tři typy senzorů – termočláanky, RTD a termistory.

### 1.4.1 Termočláanky

Termočláanek je v podstatě zdroj elektrického napětí, využívající takzvaného Seebeckova termoelektrického jevu. Když se každý konec kovu nachází v jiné teplotě, vzniká mezi oběma konci drátu elektrický potenciál (princip viz obr 1.2). Kov 1 má jiný termoelektrický koeficient  $\alpha$  než kov 2. Tím je zapříčiněno, že když spojíme tyto dráty na jednom (měřicím) konci, potom na druhém (referenčním) konci bude každý vykazovat jiný elektrický potenciál, čímž mezi kovy vznikne napětí v řádech mikrovoltů. Velikost tohoto napětí je, v závislosti na rozdílu teplot, pro určité dvojice kovů používané v termočláancích dobře známa.



Obr 1.2: Princip termočláanky (převzato z[1])

Pro měření elektrického napětí mezi konci platí zjednodušeně vzorec:

$$U = \alpha_1(t_1 - t_2) - \alpha_2(t_1 - t_2)$$

Pokud víme materiál (typ) termočláanky, stačí znát teplotu  $t_2$ , tedy referenční, aby bylo možno usuzovat na skutečnou velikost teploty  $t_1$ . Z uvedeného vzorce je patrné, že je takto měřen pouze rozdíl teplot mezi oběma konci  $t_1$  a  $t_2$ , nikoliv teplota absolutní. V praxi se proto provádí kompenzace referenčního konce (CJC). Tu je možno realizovat hardwarově nebo softwarově. V měřicích kartách od NI je většinou umístěn přesný termistor poblíž svorkovnice, který zajišťuje měření teploty  $t_2$ . Při hardwarové kompenzaci elektronický obvod v kartě generuje kompenzační napětí podle teploty okolí. Pro každý typ termočláanky, (J, K, E atd..) který umí karta měřit je však zapotřebí mít zvláštní kompenzační obvod. Eventuálně je možné použít softwarovou kompenzaci, která podle referenční teploty  $t_2$  a typu termočláanky zadaného v aplikaci řeší potřebné výpočty za pomoci numerických metod (výstup z termočláanky bývá u větších rozdílů teplot značně nelineární).

Termočláanková čidla se dělí do řady typů označených písmenem. Jsou zkonstruovány z různých kovů a mají různé tepelné rozsahy a citlivost. Při výběru termočláanky je tedy důležitý teplotní rozsah, doba odezvy, chemická odolnost termočláanky nebo materiálu pláště, mechanická odolnost a případně i rozměry kvůli instalaci čidla. Poměrně důležitou charakteristikou bývá doba odezvy, která je závislá

jednak na použitém materiálu, a také na provedení sondy - zda je opatřena pláštěm nebo jde o nechráněný spoj. Nejpoužívanější typy:

- K - nejběžnější typ sond s velkým teplotním rozsahem až od  $-200$  do  $+1250$  °C. Použitý materiál je slitina Ni-Cr proti Ni-Al. Standardní přesnost je více než  $2,2$  °C nebo  $0,75\%$ . Dále je třeba poznamenat, že tento typ je zčásti magnetický, takže při dosažení cca  $354$  °C procházejí jeho charakteristiky skokovou změnou.
- J - rozsah teplot  $0 - 750$  °C, standardní přesnost je více než  $2,2$  °C nebo  $0,75\%$ . Materiál je železo a konstantan (slitina Cu-Ni). Při vyšších teplotách rychle oxiduje a pro nižší se naopak nedoporučuje.
- E - teploty  $-200$  až  $+900$  °C. Standardní přesnost je více než  $1,7$  °C nebo  $0,5\%$ . Materiál Ni-Cr proti Cu-Ni.
- T - teploty  $-250$  až  $+350$  °C. Standardní přesnost je více než  $1,0$  °C nebo  $0,75\%$ . Materiál Cu proti Cu-Ni. Vhodný do vlhka a nízkých teplot.

Ostatní typy mají buďto nižší přesnost, nebo jiné nevýhody proč nejsou tak často používané. Termočlánky obecně se vyznačují relativně nízkou přesností, vysokým měřicím rozsahem, dobrou odolností a nízkou cenou.

Pro přesné dlouhodobé měření teploty hornin nejsou termočlánky tak vhodné jako odporové teploměry či RTD.

#### **1.4.2 Termistory**

Termistor je polovodičovou součástí, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Může přitom být závislý přímo úměrně - pak se jedná o typ PTC, takzvaný pozistor, nebo nepřímo úměrně, potom se jedná o NTC neboli negastor. Zatímco pozistorů je využíváno jako tepelných ochran, teplotních regulátorů či omezovačů proudu, NTC charakteristiky je využíváno i u termistorových čidel teploty. Běžně se používají pro měření teplot od  $-50$  °C do  $150$  °C, kde se chyba měření pohybuje do  $1$  °C. Při použití od  $0$  °C do  $100$  °C jsou někteří výrobci schopni dokonce zaručit přesnost  $0,1$  °C. Teplotní závislosti viz obr 1.3. Termistory jsou tedy rychlé, přesné, zároveň však málo odolné a jejich odporová charakteristika je značně nelineární.

#### **1.4.3 RTD – odporové teploměry**

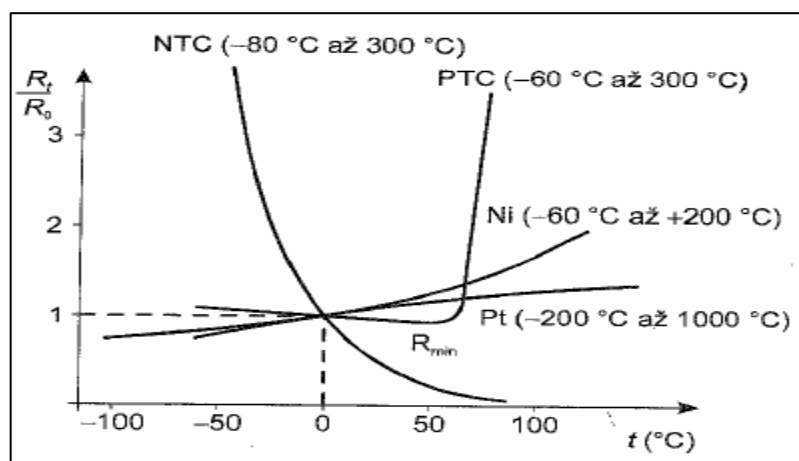
RTD neboli odporové teplotní čidlo, využívá změnu odporu v kovu v závislosti na teplotě. Nejčastější typy odporových teplotních čidel se vyrábějí z platiny, niklu, mědi či jejich slitin. Měď má malou rezistivitu a používá se pro rozsahy od  $-200$  °C do  $200$  °C. Niklové snímače jsou citlivé, rychlé a malé. Rozsah je však pouze od  $-50$  °C do  $150$  °C. Platina je chemicky netečná a její teplotní rozsah je běžně od  $-200$  °C do  $850$  °C. V praxi se pak nejčastěji setkáme s čidly z rodiny PT 100. Ta mají

odpor přesně 100 ohmů při 0 °C. Tento odpor se mění v závislosti na okolní teplotě a je měřen za pomoci jednoho z možných zapojení Wheatstoneova můstku. Nevyvážený můstek poskytuje rozdílové napětí, které nám dává informaci o skutečné teplotě.

Měřicí rozsah platinových čidel je sice poměrně značný, ve vyšších teplotách ale narůstá nepřesnost měření – podle výrobce [2] je při 850 °C standardní chyba 4,6 °C.

Teplota °C	Ohmy	°C
-200	±0.56	±1.3
-100	±0.32	±0.8
0	±0.12	±0.3
100	±0.30	±0.8
200	±0.48	±1.3
300	±0.64	±1.8
400	±0.79	±2.3
500	±0.93	±2.8
600	±1.06	±3.3
650	±1.13	±3.6
700	±1.17	±3.8
800	±1.28	±4.3
850	±1.34	±4.6

Tab 1.1: Přesnost standardních odporových teploměrů OMEGA (převzato z [2])



Obr 1.3: Teplotní závislosti NTC a PTC termistorů a kovových odporových senzorů Pt, Ni (převzato z [1])

Odporové kovové teploměry se vyznačují dosti vysokou přesností a stabilitou. Jejich signál je odolný vůči rušení a proto vhodný k měření teploty v motorech, generátorech. Jsou však poměrně drahé, a mají ze všech tří typů senzorů nejdelší dobu odezvy.

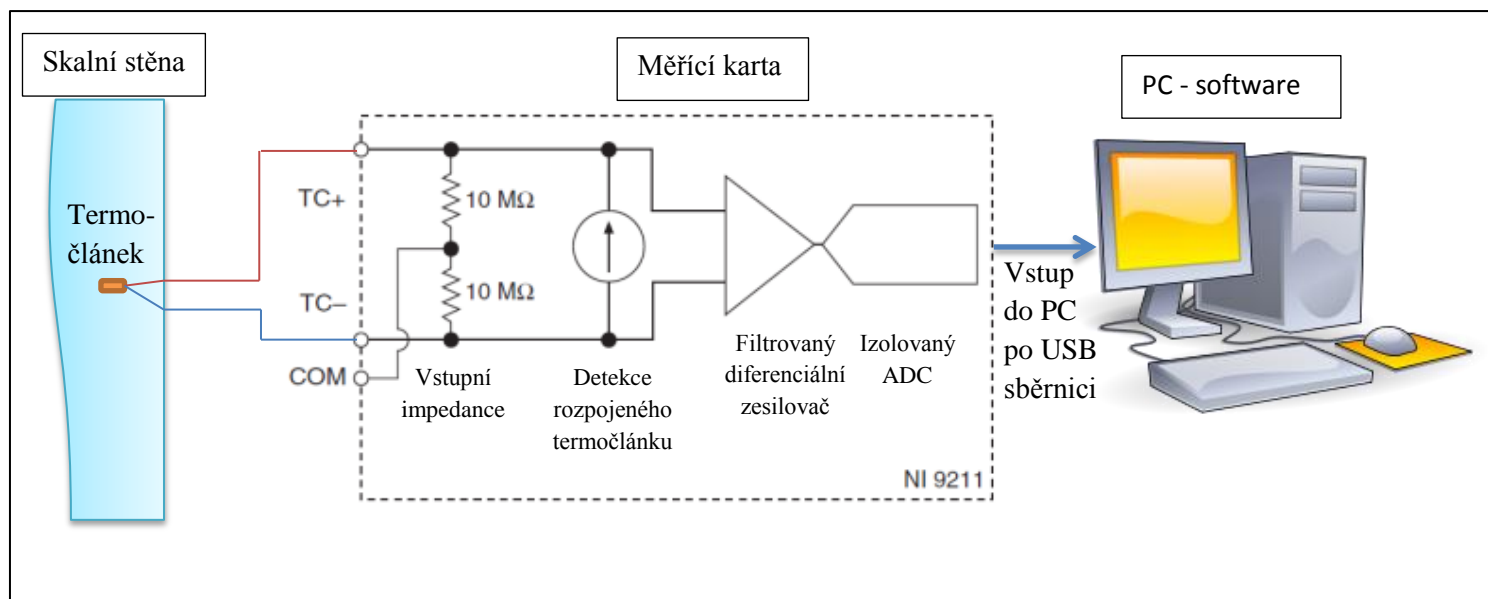
## 2 Měřicí řetězec - hardware

Měření teploty hornin je realizováno pomocí hardware umožňujícího sběr dat z čidla a jeho digitalizaci pro zpracování v softwaru počítače. Na trhu je k dostání celá řada řešení od specializovaných firem. Tato kapitola se zabývá hardwarovými prostředky potřebnými k realizaci celého měřicího řetězce.

### 2.1 Výběr hardware

Jeden z nejucelenějších sortimentů hardwarových i softwarových prostředků k získávání a zpracování měřených dat nabízí nadnárodní společnost National Instruments, která se uvedenou problematikou zabývá již od roku 1976. Na Technické univerzitě v Liberci je k dispozici zavedená infrastruktura jak k výuce programování v prostředí Labview, tak hardware od NI k realizaci měření.

Napěťový signál z termočlánku (řádově mV) je zaveden na vstupy měřicí karty, která se v prvním kroku postará o kompenzaci CJC. Následuje detekce rozpojeného termočlánku (ODT obvod), aby měl uživatel jistotu, že jsou měřena pouze validní data. V dalším kroku je signál zesílen na úroveň voltů a následně digitalizován 24bit delta-sigma převodníkem. Číselková data jsou z bufferu karty přenášena přes USB sběrnici do PC a zpracována aplikací.



Obr 2.1: Zjednodušené schéma měřicího řetězce

NI nabízí měřicí moduly (karty) pro všechny tři typy kontaktního měření teploty, uvedené v kapitole 1.4. Tyto se dále liší:

- typem platformy / sběrnice
  - CompactDAQ
  - CompactRIO
  - Ethernet

- PXI Platform
  - SCXI
  - USB
  - Wireless
- počtem měřících kanálů
  - rozlišením AD převodníků
  - maximální vzorkovací frekvencí

Výběr částí měřicího řetězce se odvíjí od způsobu získávání a zpracování potřebných dat a také od našich možností co se týče vybavenosti již existujícím hardware. Pro experiment ve škole Josef byla k dispozici měřicí karta NI 9211 pro termočlánky. Od toho se odvíjel i výběr typu senzoru. Nejvhodnějším termočlánekem vzhledem k vyšší přesnosti a netečnosti k vlhkému prostředí je typ T. Generování měřeného tepla zajišťuje takzvaná topná patrona - v podstatě váleček o průměru 16mm, délce 100mm a tepelném výkonu 300 W.

### 2.1.1 Měřicí karta

Měřicí karta NI 9211 je určena k měření teploty termočlánky a tomu jsou uzpůsobeny i její specifikace:

- 4 diferenciální kanály pro termočlánky nebo  $\pm 80\text{mV}$  analogový vstup
- 24 bitové rozlišení delta-sigma AD převodníku
- antialiasingové filtry
- kompenzace studeného spoje – nutnost při měření termočlánky
- maximální vzorkovací frekvence 14 vzorků za sekundu na kanál (multiplexor)

Některé synchronní DAQ systémy užívají AD převodník pro každý měřicí kanál. Tímto způsobem jsou data digitalizována skutečně paralelně. To však značně zvyšuje cenu i složitost měřicí karty. Proto se u pomalejších dějů používá multiplexoru, který postupně přepíná vstupy jednotlivých kanálů do jednoho AD převodníku. Měření teploty většinou nevyžaduje tak vysokou vzorkovací frekvenci, aby nemohl být tento princip využit.



Obr 2.2: Měřicí modul pro termočlánky NI 9211

Tento modul je určen k vložení do šasi pro jeden nebo více modulů, zajišťující konektivitu s počítačem prostřednictvím USB, Wi-Fi nebo Ethernetu. V našem případě bylo k dispozici šasi pro jeden modul a USB připojení.

### 2.1.2 Čidlo

Při měření teploty ve štolě Josef byly použity termočlánky typu T od výrobce Omega s přesností 0,5% nebo 0,4V. Termočlánky typu T mají relativně malý teplotní rozsah -250 až 350 °C, pro potřeby tohoto měření však zcela postačují. Naproti tomu dosahují lepší přesnosti než jiné typy termočlánků. Vzhledem k tomu že mají jen velmi malou tendenci k oxidování, jsou vhodné do vlhkého prostředí i v nechráněném provedení.

## 2.2 Sada driverů NI-DAQmx

Pokud hodláme realizovat sběr dat prostřednictvím hardwaru od NI, je nutné použít sadu driverů NI-DAQmx pro obsluhu zařízení pro získávání dat - data acquisition (zkr. DAQ). V současné době jsou ve verzi 9.0 a už z jejich velikosti cca 1100 MB lze poznat, že obsluhují opravdu bohatou škálu přístrojů, kterou NI vyrábí. Mimo jiné je díky nim možné nasimulovat virtuálně jakoukoliv DAQmx měřicí kartu od NI pro potřeby vývoje patřičného software.



### 3 Softwarové prostředky

Tato kapitola se zabývá vývojovým prostředím, v němž byla realizována aplikace specializovaná na sběr a zpracování požadovaných dat, a také obecnými postupy při této realizaci.

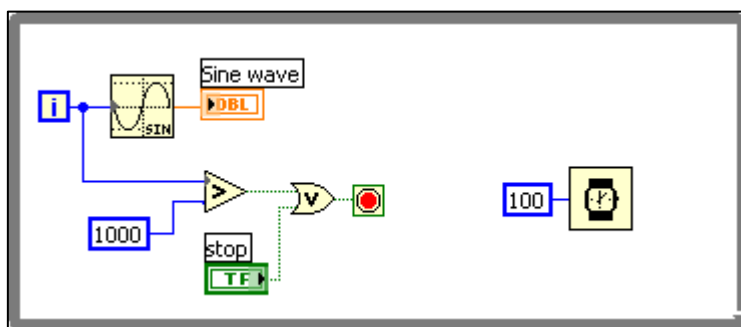
#### 3.1 Programovací prostředí Labview

Labview je grafické programovací prostředí v jazyce „G“ od firmy National Instruments. Slouží k vytváření softwaru pro měření, sběr dat, jejich interpretaci a manipulaci. Obsahuje stovky zabudovaných knihoven pro pokročilou analýzu a vizualizaci dat. Běží na všech třech hlavních platformách - Linux, Windows i MAC.

##### 3.1.1 Grafické programování

Princip grafického programování bývá technikům dobře známý například z nástroje Simulink v Matlabu. Grafické funkční bloky představující určité operace s daty jsou propojeny cestami, po kterých data putují. Tyto cesty mají barvu podle příslušného datového typu - Integer, Real, String, Boolean atd. Jsou přítomny i obvyklé cykly For a While, doplněné o podobné struktury jako Event, Case a další. Každý funkční blok nebo cyklus je vyřešen v okamžiku, kdy do jeho vstupních terminálů přijdou všechna očekávaná data. Tento datový tok (označovaný jako Data flow) probíhá často do několika objektů najednou, a jazyk G je schopen vyhodnocovat tyto úkoly paralelně. Slouží k tomu zabudovaný plánovač procesů, který rozděluje pomocí multiplexingu vlákna v operačním systému pro objekty připravené k odbavení.

Tento styl psaní kódu je záměrně co nejvíce intuitivní, neboť software pro obsluhu měřících přístrojů často vytvářejí i lidé, jejichž hlavní profesí není programování. Tvůrce takového software hned vidí, která data a kam putují a co se tam s nimi děje.

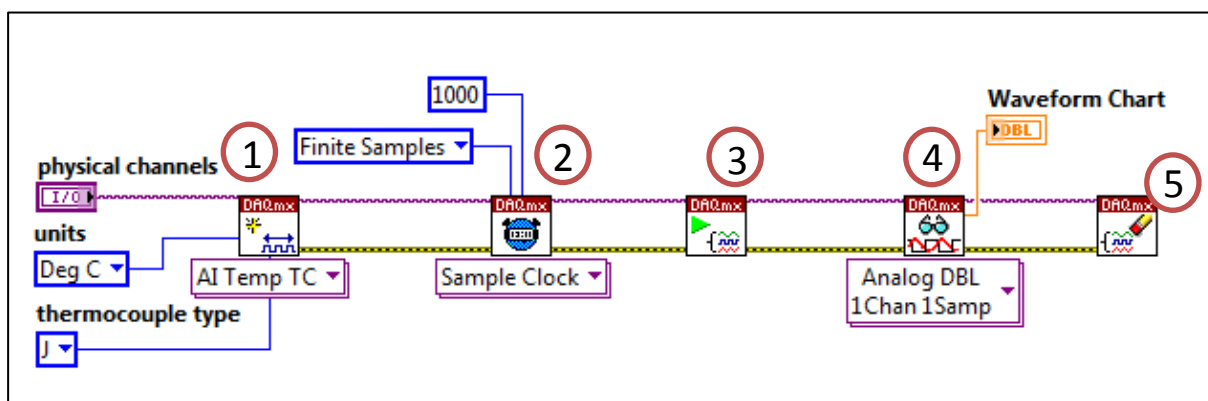


Obr 3.1: Realizace cyklu while

Na obr. 3.1 je vidět část kódu programu obsahující cyklus while. Dochází zde ke generování sinusového signálu. Celý cyklus while iteruje stále dokola, dokud nedojde buďto ke stisknutí tlačítka stop, nebo neproběhne tisíc cyklů. Před každou iterací program čeká 100 milisekund, aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování procesoru. Oranžové cesty vedou datový typ real, modré integer, zelené pak boolean.

### 3.1.2 Sběr dat

Ke sběru dat z hardware slouží zabudovaná sada driverů NI-DAQmx. V programu je reprezentována funkčními bloky (viz obr 3.2), které zpravidla nejprve vytvoří virtuální měřicí kanál (1). Ten obsahuje řadu nastavení jako jméno, fyzický kanál měření, vstupní konektory, typ měřené veličiny či její rozsah. Ke kanálu je přiřazena měřicí úloha, která reprezentuje měření nebo generování signálu – například lze vytvořit úlohu měření teploty na jednom nebo více kanálech měřicí karty [3]. V dalším bloku (2) je konfigurován počet vzorků, které mají být vyčteny nebo generovány a je vytvořen buffer, pokud je to potřeba. Měřicí úloha přechází do běžícího stavu (3). Poté dochází, většinou opakovaně, k samotnému vyčítání vzorků (4), jejich vykreslování do grafu, jakékoliv úpravě či ukládání do souboru. Když je měření skončeno, dalším funkčním blokem se měřicí úloha ukončí (5) a uvolní se prostředky karty.



Obr 3.2: Funkční bloky NI-DAQmx

## 3.2 Shift registry

V textu této práce bude poměrně často zmiňován takzvaný shift registr (obr 3.3). Vzhledem ke specifickému způsobu toku dat v jazyce G je potřeba někde ukládat proměnné mezi jednotlivými iteracemi. Právě k tomu slouží zmíněné shift registry – na levé straně struktury se nachází jejich vstup, pak datový tok prochází strukturou a vychází na pravé straně. Uvnitř struktury může být buďto změněn, nebo ponechán jak je. Je běžné, že shift registr neobsahuje jenom jeden typ dat, ale často celé pole, či cluster různých datových typů.

## 3.3 Stavový automat

Při tvorbě programu ke sběru dat je vhodné využít principu stavového automatu (SA). Téměř každý technický úkol v reálném světě lze popsat pomocí diagramu stavů. Princip SA je v Labview poměrně často využíván pro zpřehlednění kódu, relativně snadnou implementaci rozhodovacích algoritmů a snadnou modifikaci. Každý stav plní nějaký určitý úkol a také obsahuje rozhodovací logiku, díky které je jasně určeno, který stav bude následovat.

K realizaci SA v Labview je zapotřebí:

- Smyčka While, zajišťující neustálou iteraci programu a tím přechod mezi jednotlivými stavy, dokud není splněna ukončující podmínka
- Struktura Case – obsahuje jednotlivé stavy, kód programu, který v nich má být vykonán a rozhodovací logiku pro přechod do dalšího stavu
- Shift registry – uchovávají jednak hodnoty proměnných při přechodu do dalšího stavu, a také slouží k přechodu do dalšího stavu pomocí připojeného pole stavů v případě fronty stavů (viz dále)

Case struktura v tomto případě funguje tak, že pokud na selektor přivedeme hodnotu, danou takzvaným enumerativním datovým typem, bude zvolen příslušný case (stav). Enumerativní typ (enum) je jedním z datových typů. Jedná se vlastně o jakési symbolické konstanty. Uživatel si pro nový výčtový typ sám definuje množinu přípustných hodnot uvedením všech jejich prvků. Není tedy problém vytvořit si pomocí enum nový typ, jež může nabývat například hodnot ConfigCteni, Inicializace, VypisNastaveni atd, jako je tomu v případě aplikace METEH. Vnitřně jsou pak tyto konstanty reprezentovány celými čísly (převzato částečně z [7]). Tedy například:

Numerická hodnota	String
0	ConfigCteni
1	Inicializace
2	VypisNastaveni

Tab 3.1: Příklad enumerativního datového typu

Tímto způsobem lze pro programátora srozumitelným způsobem přecházet mezi jednotlivými stavy v Case struktuře.

V programu mohou nastat situace, kdy je třeba, aby bylo již před vstupem do určitého stavu rozhodnuto, které stavy budou následovat. Především proto, že do určitého stavu je možno se dostat z několika různých stavů předchozích. Program by nedokázal správně pokračovat bez použití zbytečně komplikované rozhodovací logiky. Místo toho se používá mechanismus takzvané fronty stavů, která je vidět na obrázku 3.3. Zde funkční blok Enqueue element zařazuje stavy do fronty, další blok Dequeue element stavy postupně vyřazuje a vrací právě vyřazený stav. Ten je realizován v Case struktuře prostřednictvím Case selectoru. V shift registeru je inkrementován ukazatel počtu průchodů. Rozhodovací logika uvnitř stavu poté odešle buďto stav ConfigCteni, nebo KonecProgramu do dalšího bloku Enqueue element.

Tyto SA v Labview jsou kombinací jak Mealyho, tak Mooreových stavových automatů, neboť někdy závisí výstupy na obsahu stavu i na hodnotách vstupů (Mealy), jindy pouze na hodnotách vstupů (Moore).



Na obrázku 3.4 se nalézá subVI BuildFileName.vi. Obsahuje čtyři konektory – vlevo jsou dle konvence vždy vstupní, vpravo výstupní. Toto subVI bylo vytvořeno pro aplikaci METEH a má na starost kontrolu a tvorbu jména datového souboru pro ukládání dat na disk. Samo o sobě obsahuje ve svém blokovém diagramu další tři subVI s dílčími úkoly.

## 4 Aplikace METEH

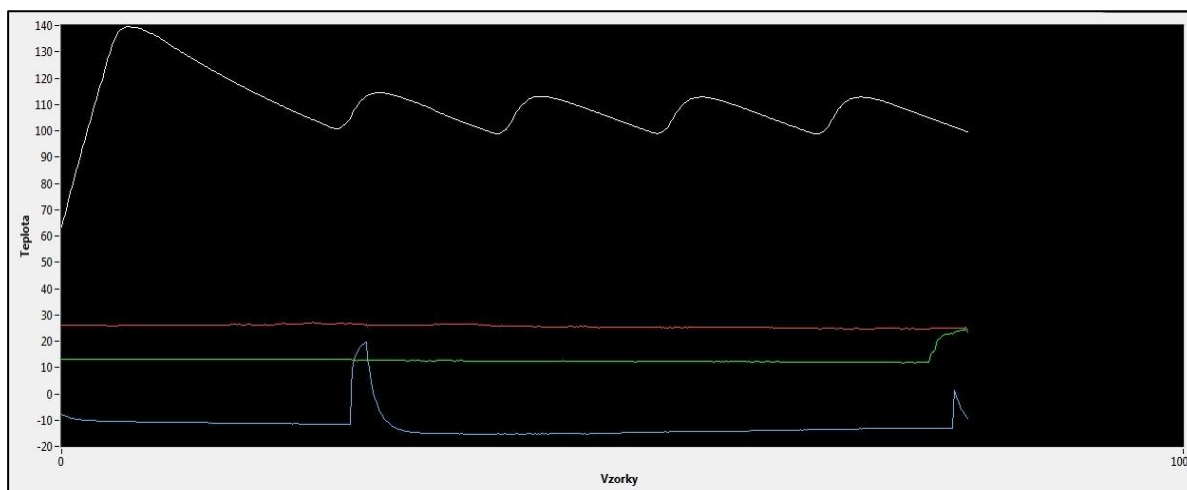
K měření teploty v horninách byla vytvořena jednoduchá aplikace METEH (měření teploty hornin). Aplikace je uzpůsobena k měření teploty jedním či více termočlánky prostřednictvím příslušných modulů NI. Tuto teplotu přitom zobrazuje do grafu a také umožňuje její ukládání do datového souboru. Tato kapitola se zabývá samotnou aplikací, popisem jejích funkcí a možností.

### 4.1 Grafický interface programu

Grafický interface programu je poměrně jednoduchý. Nahoře je lišta s výběrem několika základních položek menu. Největší část UI zabírá graf naměřených hodnot. Dole je pak vícesloupcový listbox s parametry měření a tlačítko Start/Stop.

#### 4.1.1 Graf

Na grafu jsou zobrazovány jednotlivé odebrané vzorky teploty v závislosti na počtu kanálů a vzorkovací frekvenci. Svislá osa zobrazuje teplotu, a samostatně si nastavuje rozsah podle naměřených hodnot a požadovaných jednotek teploty. Vodorovná osa zobrazuje čas od počátku měření. Jde o typ grafu „chart“ což znamená, že zobrazuje hodnoty až do velikosti nastavené historie - takzvaný kruhový buffer.



Obr 4.1: Graf se čtyřmi měřenými kanály

#### 4.1.2 Listbox s parametry měření

Zde jsou vypsány parametry pro současné měření - zda je požadováno ukládání dat, a do kterého souboru, dále jednotky teploty, typ použitých termočlánků, vzorkovací frekvence v hertzech a použité fyzické kanály na měřicí kartě.

Parametry měření:	
Ukládání dat	Ano - Data_000.lvm
Jednotky teploty	Stupně Celsia
Typ termočlánku	T
Vzorkovací frekvence	0,20
Fyzické kanály	Dev1/ai0:3

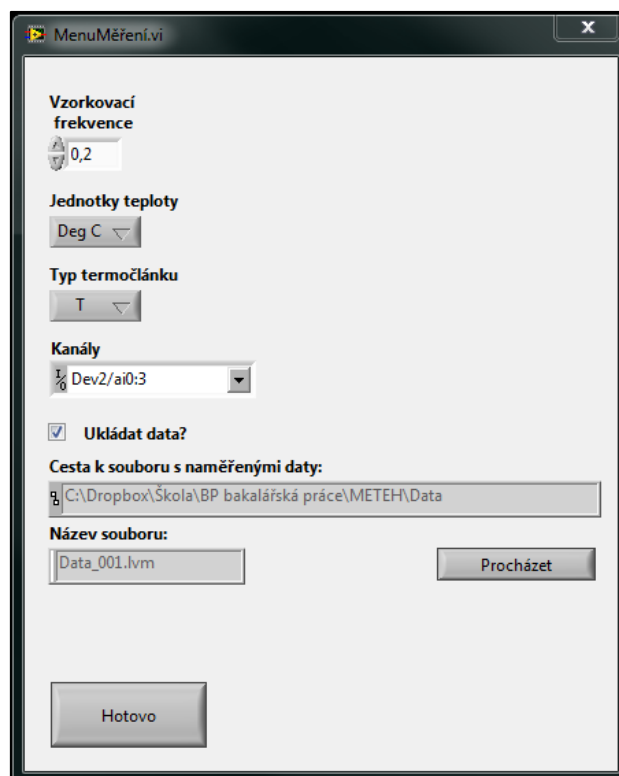
Obr 4.2: Listbox s parametry měření

#### 4.1.3 Menu na horní liště

Horní lišta obsahuje v podstatě tři volby - ukončení aplikace, vstup do okna s nastavením parametrů měření a nápovědu. Volba „Nastavení měření“ je v průběhu samotného měření znepřístupněna, aby uživatel neměl možnost měnit za běhu např. vzorkovací frekvenci nebo měřicí kanály, což by bylo pro chod programu nežádoucí.

## 4.2 Okno s nastavením parametrů měření

Po stisknutí volby na horní liště „Nastavení měření“ se otevře okno s následujícími volbami:



Obr 4.3: Nastavování parametrů měření

Vzorkovací frekvence:

Fs v Herzích. Maximální možná Fs pro kartu NI9211 je:

- 6 Hz pro jeden kanál
- 4 Hz pro dva kanály
- 3 Hz pro tři kanály

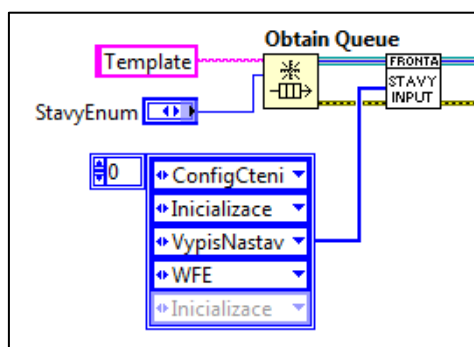
- 2,4 Hz pro čtyři kanály

Jednotky teploty:	Je možno měřit ve stupních Celsia, Fahrenheita, Rankina nebo v Kelvinech
Typ termočlánku:	Je možno nastavit typy: J, K, N, R, S, T, B, E
Kanály:	Nastavení měřicího modulu a jeho kanálů
Ukládat data?	Volba pro ukládání dat do souboru v průběhu měření
Cesta k souboru s daty:	Zobrazuje cestu k adresáři, kam se ukládají soubory s daty
Název souboru:	Zobrazuje název souboru s daty bez koncovky. Pokud je bez číselné přípony, program ji přiřadí sám
Procházet:	Zobrazí standardní dialog výběru souboru kam ukládat data. Stačí zvolit jméno souboru, program sám přiřadí číselné označení i koncovku

### 4.3 Popis fungování programu

Aplikace funguje na principu stavového automatu s frontou. V příloze této bakalářské práce se nachází vývojový diagram programu. Je z něj patrné, že existuje jeden určitý rozhodovací bod, do kterého se program vrací z celkem 23 míst (návratový bod A). Vedou do něho prakticky všechny větve kromě jediné, jež je ukončením a uzavřením programu.

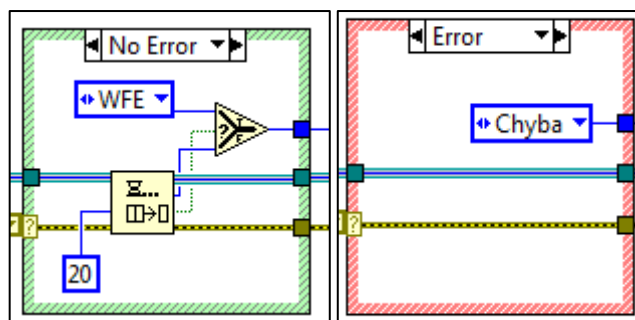
METEHE si po startu vytvoří frontu, na kterou se bude později mnohokrát odkazovat. Zařadí do fronty stavy ConfigCteni, Inicializace, VypisNastav a WFE (wait for event, neboli čekej na událost).



Obr 4.4: Vytváření fronty



Následně se inicializují počáteční hodnoty shift registrů. Poté následuje vstup do smyčky While, kterou program neopustí až do ukončení běhu a která zajišťuje přechod mezi stavy.



Obr 4.5: Oba stavy Case struktury zjišťující chyby a vyřizující stavy

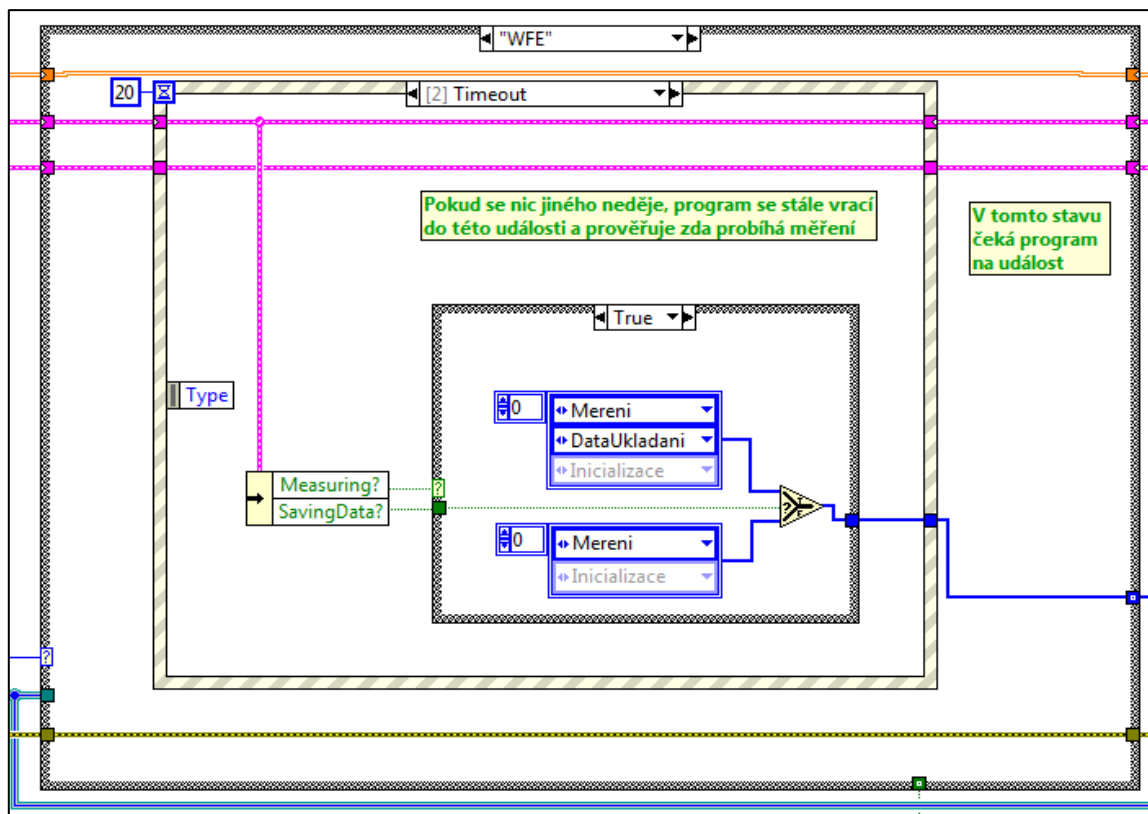
Ve smyčce je na prvním místě zjištěno, zda v programu nedošlo mezitím k chybě. Pokud ano, zařadí Case struktura z obrázku 4.5 na první místo ve frontě stav „Chyba“. Pokud nedošlo k žádné chybě, vykonávají se postupně stavy, jež byly vloženy do fronty.

#### 4.4 Popis jednotlivých stavů hlavní Case struktury

- ConfigCteni - v tomto stavu probíhá načtení nastavení ze souboru config.ini. Obsahuje subVI ConfigRead.vi které toto zajišťuje a ukládá načtené hodnoty do shift registrů
- ConfigUlozeni - v tomto stavu probíhá uložení nastavení do souboru config.ini. Obsahuje subVI ConfigSave.vi
- Inicializace – zde probíhá nastavení počátečních hodnot uživatelského rozhraní
- WFE – (Watch for Events) obsahuje Event strukturu neboli smyčku čekající na tři možné typy událostí vygenerované uživatelem a následně provádí akce k této události přidružené
  - Menu selection (user) – obstarává obsluhu událostí při stisku některé volby na horní liště programu, tedy ukončení programu, nastavení měření a nápověda
  - „start“ value change – pokud bylo stisknuto tlačítko Start / Stop, řeší, zda má zahájit nebo ukončit měření, případně i ukládání dat
  - Timeout – Tato událost se automaticky vykoná, pokud během časového limitu 20ms nedojde uživatelem k vygenerování žádné jiné události. Program dále pokračuje v běhu. Toto zajišťuje, že uživatel může v kterýkoliv moment interagovat s programem, například zastavit měření. Zároveň nebrání programu dostatečně rychle kontrolovat aktuální stav fronty

- MereniPriprava - v tomto stavu se připravuje soubor pro ukládání dat a některé ovládací prvky jsou znepřístupněny. Obsahuje subVI BuildFileName.vi které kontroluje správnost cesty k datovému souboru a nastavuje příslušnou číselnou koncovku, aby nedošlo k přepsání již existujícího souboru
- MereniStart - v tomto stavu program nastavuje parametry měřicí úlohy (measuring task) pro měření podle aktivního nastavení. Dále nastavuje na true příznak *Measuring?*, který určuje, že probíhá měření
- Mereni - v tomto stavu program vyčítá vzorky z bufferu měřicí karty, vykresluje je do grafu a ukládá do shift registru. Dokud není stisknuto tlačítko Stop, program cyklicky přechází mezi stavem WFE a Mereni. Tím je zajištěno opakované vyčítání bufferu a rovněž možnost pro uživatele kdykoliv měření zastavit
- MereniStop - zde je ukončeno měření po stisknutí tlačítka STOP a zpřístupněny ovládací prvky menu. Příznak *Measuring?* je nastaven na false
- DataPriprava – příznak *SavingData?* je nastaven na true, aby program začal do fronty měření přidávat i stav DataUkladani. Dále je zde subVI DataHeader.vi, které vloží hlavičku s parametry měření, časem a dalšími údaji na začátek nového souboru s daty
- DataUkladani – obsahuje Case strukturu která zjišťuje, zda shift registr s daty obsahuje nové vzorky. Pokud ano, naformátuje je a uloží na konec datového souboru
- NastaveniMereni – v tomto stavu se nachází subVI NastaveniMereni.vi, které po inicializaci ukáže uživateli panel s ovladači parametrů měření. Toto subVI obsahuje několik dalších subVI, které se starají např. o nastavení správných výchozích hodnot ukazatelů či nastavení cesty k datovému souboru. Podrobněji viz kapitola 4.3. a příloha B
- VypisNastaveni – obsahuje subVI ListBoxData.vi, kde jsou z shift registrů načteny parametry měření, určující například zda a kam se ukládají data, jednotky teploty, vzorkovací frekvence, a další. Ty jsou potom vypsány ve vicesloupcovém listboxu hlavního VI, které vidí uživatel za chodu programu
- Chyba – tento stav má za úkol ukončit veškerou předchozí činnost a vyřešit chybu, ke které došlo. Nejprve dojde k nastavení příznaku *Measuring?* na false. Dále je ukončen measuring task (pokud je aktivní) a vyprázdněna fronta. Nakonec je zavoláno subVI ErrorHandler.vi, které ukáže uživateli kód a popis chyby

- KonecPriprava – v případě volby menu *Ukončit* přejde program z WFE do tohoto stavu. Uživatel je vyzván, zda si opravdu přeje skončit. Pokud ano, přechází do stavu KonecProgramu
- KonecProgramu – zde je ukončen běh programu



Obr 4.6: Hlavní Case struktura ve stavu WFE

## 5 Měření teploty v praxi - pokus ve štole Josef

Tato kapitola se zabývá praktickým pokusem s měřením prostupu tepla horninou, provedeném ve štole Josef za pomoci vybraného měřicího řetězce a vyvinuté aplikace METEH. Obě fáze pokusu proběhly v květnu roku 2011.

### 5.1 Cíle měření

Provedení měření tepelné vodivosti horniny v praxi bylo logickým vyústěním této práce. Šlo tedy o ověření chování jak celého navrženého měřicího řetězce, tak i samotné aplikace METEH. Dále bylo cílem ověřit simulací zjištěnou tepelnou vodivost horniny a porovnat výsledky.

V neposlední řadě měla druhá část experimentu umožnit porovnat chování termočlánků, obklopených v hornině pouze vzduchem, oproti situaci, kdy je tento prostor vyplněn tzv. geopolymérem (viz 5.2.1). Běžně se při těchto typech měření předpokládá, že vliv vzduchu obklopujícího snímač je zanedbatelný. Snímač pak vlastně měří teplotu vzduchu v otvoru, která by ovšem při dostatečně malém otvoru a množství vzduchu v něm měla být totožná s teplotou skály. Použití geopolyméru jako výplně otvoru by mělo zajistit lepší přenos tepla mezi skálou a snímačem a tím zpřesnit výsledky měření.

### 5.2 Příprava pokusu a podmínky

Měření proběhla v meziuniverzitní laboratoři ve Štole Josef, neboť je zde připraveno zázemí pro pokusy, a je zde dlouhodobě stabilní teplota horniny přibližně 11 °C.. Laboratoř se nachází na konci cca 2500 metrů dlouhého tunelu vyraženého v převážně granitovém podloží.

#### 5.2.1 Geopolymer

Jako geopolymery označujeme anorganické polymerní materiály připravované polykondenzační reakcí základních hlinito-křemičitanových oxidů ( $\text{Si}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_2$ ) v zásaditém prostředí. Dojde ke vzniku kovalentních vazeb Si-O-Al. Reakce probíhá za normální teploty a tlaku. Taková reakce byla označena jako geopolymérace. Striktní názvosloví chápe geopolymer jako produkt, který byl vytvořen z čistého metakaolinu. Jednotlivé zdroje se však na obecném termínu neshodnou. Geopolymer je však pouze jedním z typů alkalicky aktivovaných materiálů. Převzato z [6].

Důvodem pro použití geopolyméru v tomto experimentu byla jeho vlastnost vést výborně teplo a zajistit tak přenos teploty měřeného materiálu na čidla.

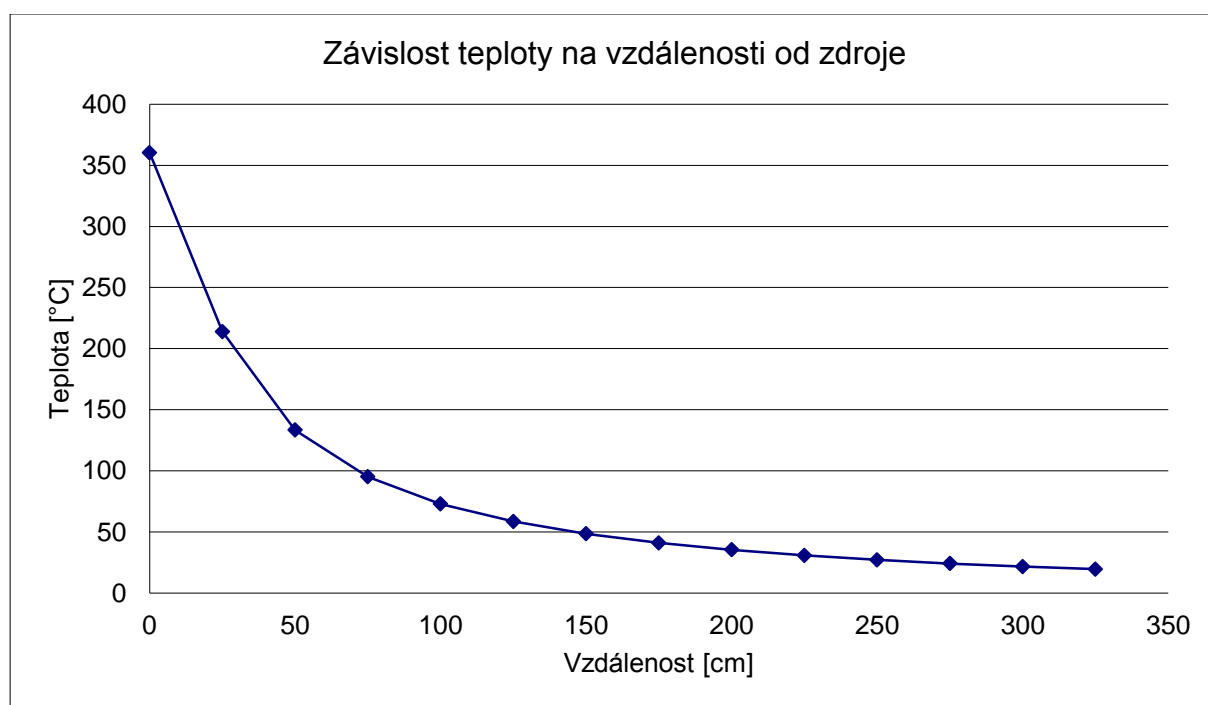
Složení použité směsi bylo: 340g aktivátoru, 50g cementové směsi Baucis 110, 250 g grafitu. Baucis 110 je komerčně namíchaná směs pro výrobu geopolymérů od ČLUZ Nové Strašecí. Obsahuje hlavně metakaolín s příměsí kaolínů a lupků, aktivátorem je louh sodný s vodním sklem.

### 5.2.2 Teoretická příprava

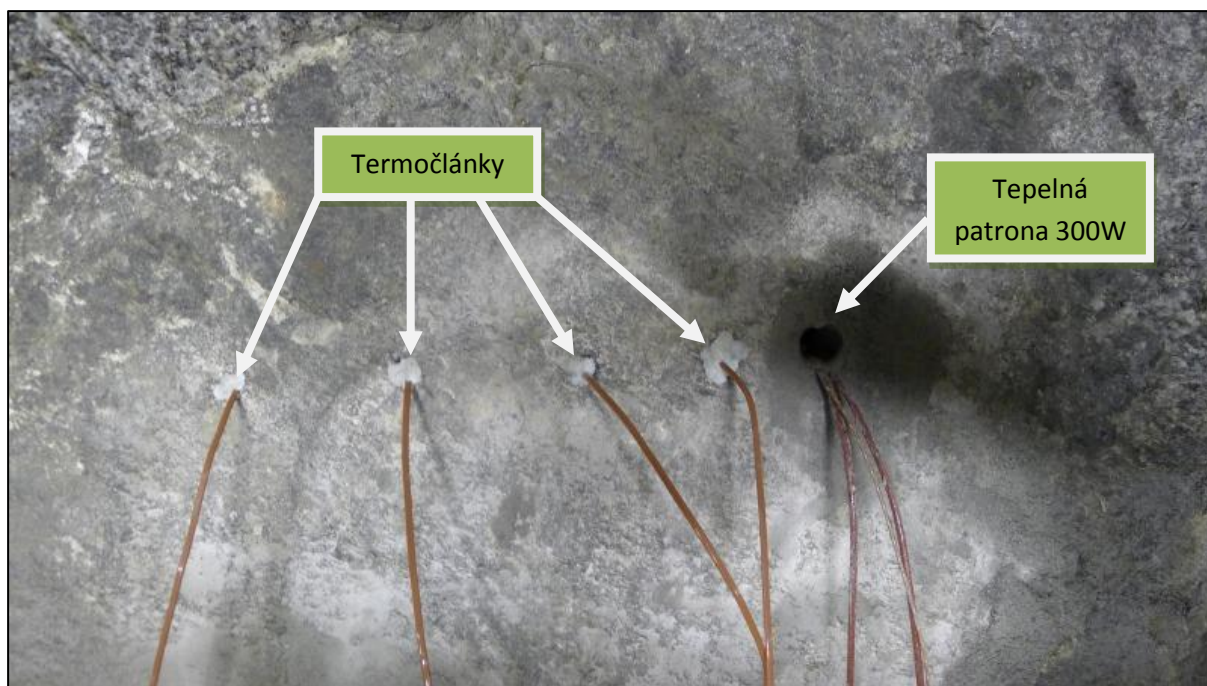
Numerickou simulací v software QuickField od Tera Analysis bylo odhadnuto, že po ustálení by se měla teplota v závislosti na vzdálenosti od zdroje tepla pohybovat podle grafu na obr. 5.1. Z něho je zřejmé, že měření má smysl jen do cca 30 centimetrů od zdroje. Nakonec bylo rozhodnuto, že termočlánky budou v rozestupech 40, 50, 60 a 70mm od sebe. Podrobnosti o simulaci viz 5.4.

### 5.2.3 Praktická příprava

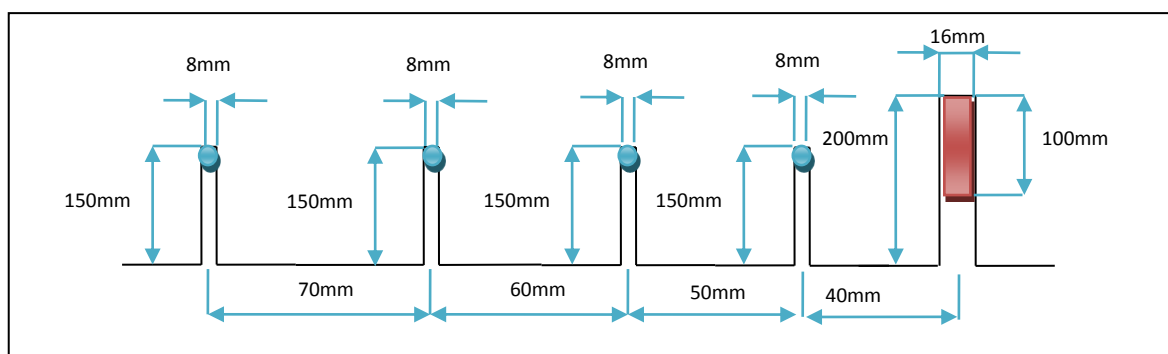
Původní představa byla taková, že budou navrtány dvě řady děr pro teplotní čidla, s dvojicí děr vždy ve stejné vzdálenosti od zdroje - jedna s a jedna bez geopolymery. Od toho bylo upuštěno jednak proto, že simultánní měření osmi termočlánků nemohlo být na jedné kartě NI9211 provedeno (má jen čtyři kanály) a jednak proto, že při vývrtnu by jistě došlo k nepřesnostem ve vzdálenostech, jež by silně ovlivňovaly výsledek měření. Byla proto navržena jen jedna řada děr - viz obr. 5.2. a 5.3. K vymezení vůle a zkvalitnění přenosu tepla byla topná patrona před vložením do horniny potřena speciálním teplovodným tmelem, užívaným pro tyto účely ve strojírenství. Termočlánky byly zapuštěny do děr a vstupy k nim zaslepeny syntetickým polymerem aby nedocházelo k proudění vzduchu a odvodu tepla.



Obr 5.1: Numerická simulace ustálené teploty při výkonu topidla 300W



*Obr 5.2: Rozmístění topidla a čidel ve skalní stěně*



*Obr 5.3: Schéma umístění termočlánků a topidla ve vývrtech - pohled shora*

### 5.3 Průběh pokusu

Praktická část byla rozdělena do dvou fází - v první byly navrtány otvory pro topnou patronu a termočlánky, a byla naměřena první část dat - bez geopolymeru. Ve druhé pak měla být naměřena druhá sada dat s termočlánky v geopolymeru. Na to byl naplánován týdenní odstup, aby geopolymer stihl zatvrdnout. K tomu zcela nedošlo vlivem nižší teploty a vyšší vlhkosti, než je běžné v laboratorních podmínkách, kde tvrdne cca týden. Měřenou horninou byl granit, neboli žula (poměrně jemnozrnný). Vzorkovací frekvence v aplikaci METEH byla nastavena na 2 Hz.

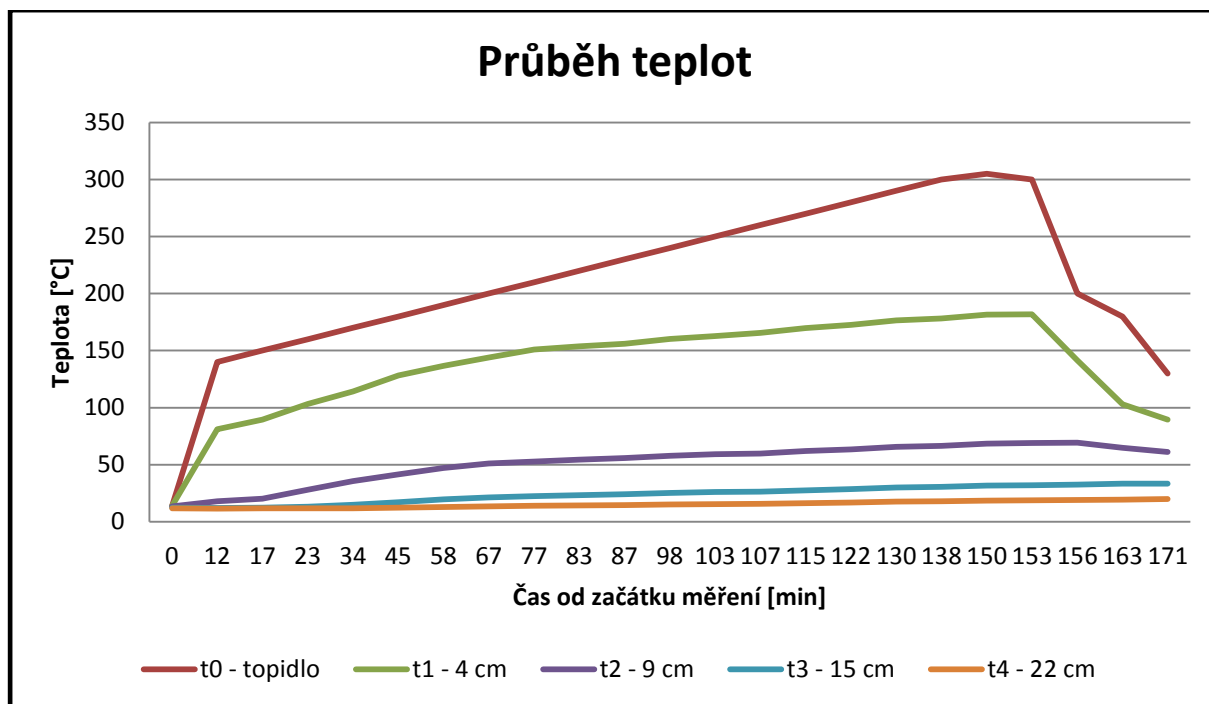
#### 5.3.1 První část experimentu

Do děr byly zapuštěny termočlánky a topná patrona. Po utěsnění otvorů bylo zapnuto topidlo do sítě a teplota začala nelineárně stoupat. Na grafu 5.5 a v tabulce 5.1 lze vysledovat, že počáteční teplota nebyla na všech čidlech předpokládaných jedenáct stupňů. Otvor pro topidlo byl totiž vrtán

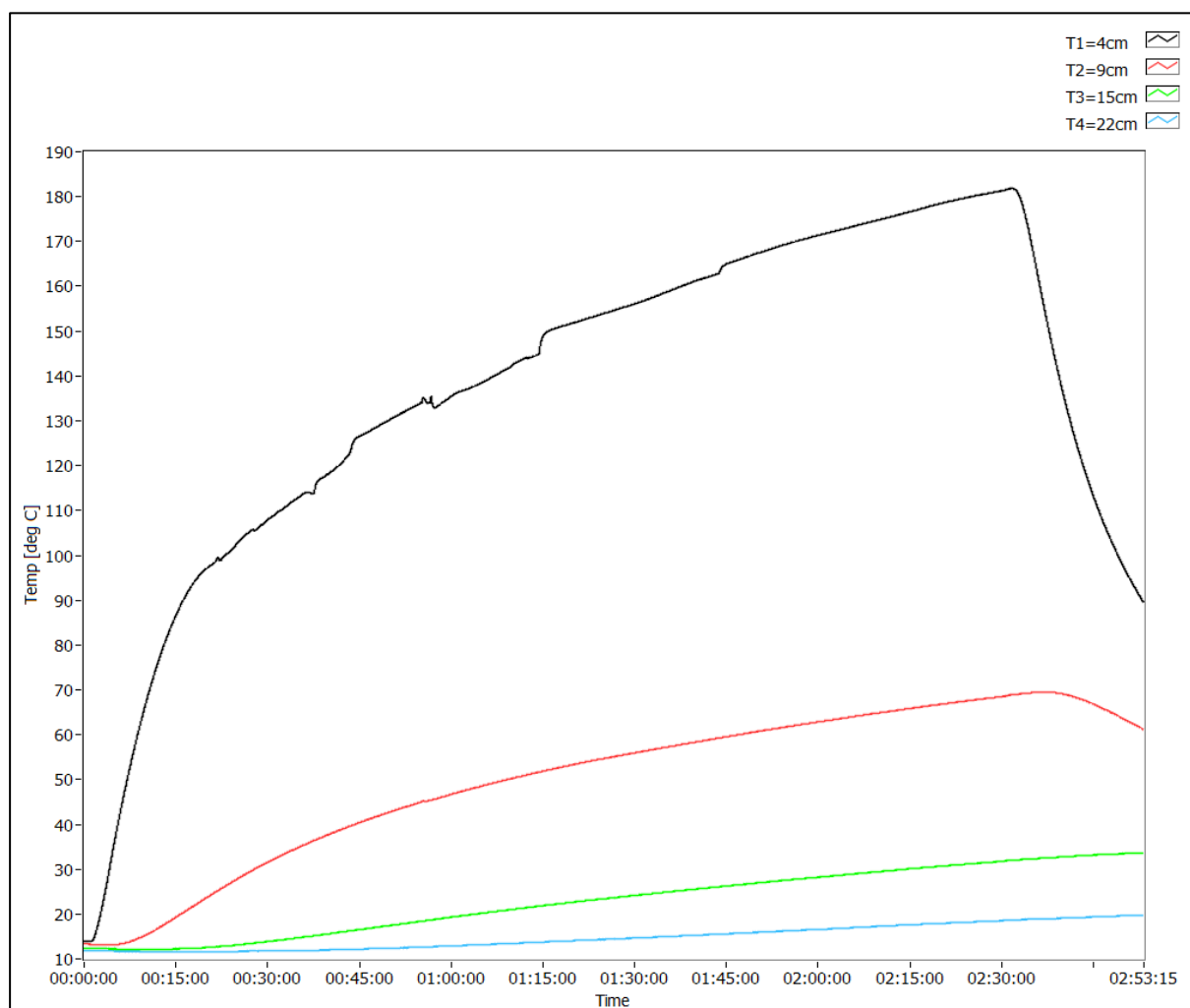
poměrně dlouho a hornina se tím mírně zahřála. Vzhledem k závěrečným teplotám ve stovkách stupňů to lze však považovat za nevýznamné. Ve 150. minutě experimentu bylo odpojeno napájení patrony.

čas od začátku [min]	Naměřená teplota termočlánku [°C]				
	t0 - topidlo	t1 - 4 cm	t2 - 9 cm	t3 - 15 cm	t4 - 22 cm
0	14	14	13	12	12
12	140	81	18	12	12
17	150	90	20	12	12
23	160	103	28	13	12
34	170	114	36	15	12
45	180	128	42	17	12
58	190	137	47	20	13
67	200	144	51	21	14
77	210	151	53	22	14
83	220	154	55	23	14
87	230	156	56	24	15
98	240	160	58	25	15
103	250	163	59	26	15
107	260	166	60	26	16
115	270	170	62	28	16
122	280	172	63	29	17
130	290	176	66	30	18
138	300	178	67	31	18
150	305	181	69	32	19
153	300	182	69	32	19
156	200	141	69	33	19
163	180	103	65	33	19
171	130	89	61	34	20

*Tab 5.1: Teploty naměřené od začátku do konce pokusu*



Obr 5.4: Průběh teplot na termočláncích a topidle z tab. 5.1

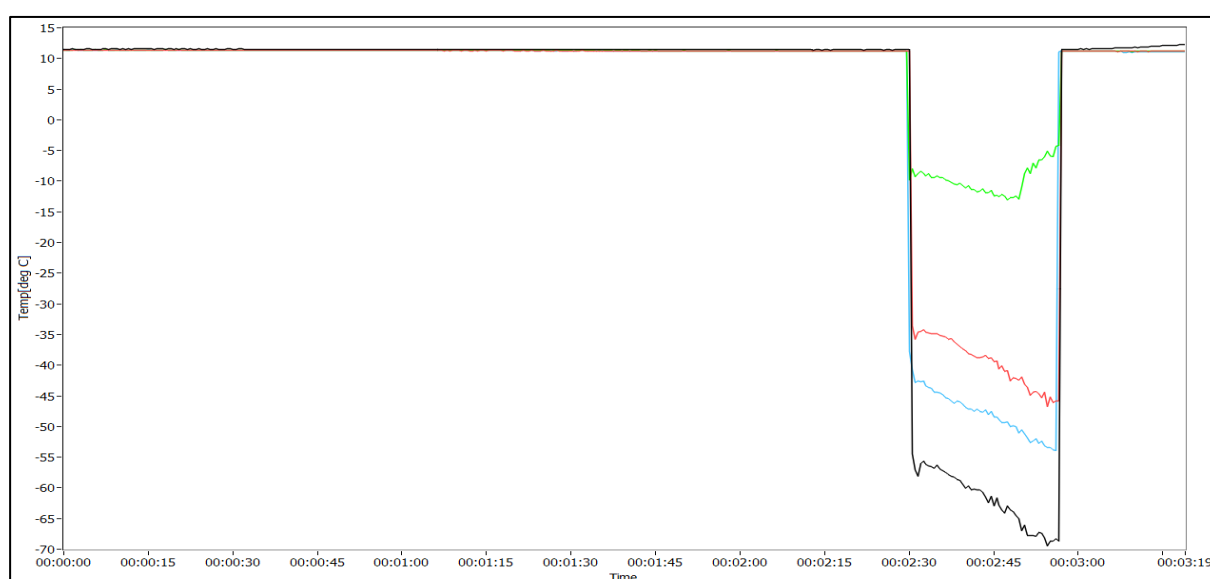


Obr 5.5: Hodnoty naměřené v průběhu celého prvního pokusu na termočláncích



### 5.3.2 Druhá část experimentu

Druhý pokus proběhl o týden později s termočlánky zalitými v napůl ztvrdlém geopolymery. Bohužel nebylo možno naměřit nějaké reálné výsledky, viz obr. 5.5. Máme za to, že topná patrona začala probíjet kvůli degradaci izolace mezi pláštěm a topnou spirálou, způsobené nedostatečným odvodem tepla z topidla do horniny. Pravděpodobně k tomu došlo již v průběhu prvního měření, avšak hornina byla zcela vysušena několika hodinami zahřívání na stovky stupňů Celsia. Chovala se proto jako dobrý elektrický izolant a probíjející patrona neovlivnila měření. Během týdne však pukliny v hornině opět zcela nasákly vodou, a impedance horniny se výrazně snížila. K tomu jistě také přispělo značné snížení přechodového elektrického odporu mezi termočlánky a horninou po jejich vložení do geopolymery, který se chová jako elektrický vodič.



Obr 5.5: Druhé měření – reakce na zapnutí topné patrony

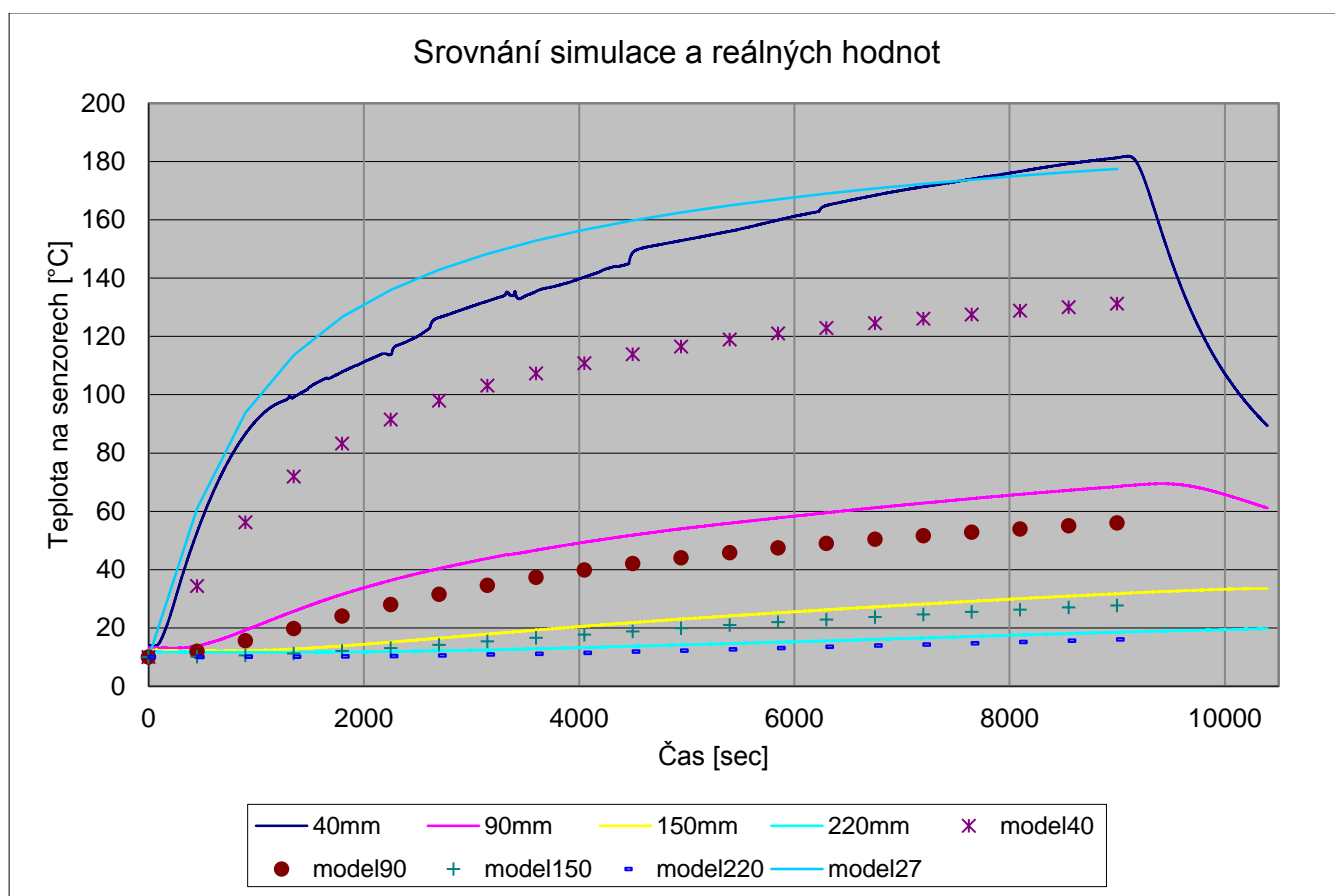
### 5.4 Závěry z praktického pokusu

První experiment probíhal nepřetržitě tři hodiny, kdy musel být ukončen z časových důvodů dříve, než došlo k ustálené hodnotě teploty. I přesto byly získány zajímavé výsledky. Za prvé jde o drobné skokové změny v průběhu dat z prvního senzoru ( $t_1 = 4\text{cm}$ ) na obrázku 5.5, například ve 37. minutě. Máme za to, že byly způsobeny problémy s odvodem tepla z patrony, odpařováním teplovodného tmelu a možná i dalšími faktory jako vodou pronikající do puklin.

Druhou zajímavostí je nesoulad s grafem teplot simulovaných před experimentem pomocí numerických metod a specializovaného softwaru. Při teplotě topidla  $305\text{ }^{\circ}\text{C}$  (nejvyšší dosažené v průběhu experimentu) měla být teplota cca  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve vzdálenosti  $4\text{ cm}$  od středu zdroje tepla, skutečná teplota však přesahovala  $166^{\circ}\text{C}$ . I na dalších senzorech byla skutečná teplota značně vyšší než předpokládaná. Na vině je pravděpodobně nepřesně zvolený koeficient přestupu tepla  $\alpha$ .

Vzdálenost senzoru [cm]	Předpokládané teploty	Skutečné teploty
4	107	166
9	34	60
15	15	26
22	12	16

Tab 5.2: Předpokládané a skutečné teploty při hodnotě 305°C na topidle



Obr 5.6: Srovnání modelované a skutečně naměřené teploty na senzorech

Na obr 5.6 lze srovnat simulované a skutečné grafy teplot. Hodnoty označené jako modelxx jsou vypočítané pomocí software QuickField. Lze vidět, že hodnotám naměřeným na nejbližším senzoru (40mm daleko od zdroje) spíše odpovídají simulované hodnoty ve vzdálenosti 27mm.

Koeficienty a proměnné zadané v simulaci byly následující:

- tepelná vodivost horniny – 3 W/m/K
- tepelná kapacita horniny – 8000 J/K/kg

- hustota horniny – 2700 kg/m<sup>3</sup>
- tepelná vodivost topidla – 100 W/m/K
- počáteční teplota uvnitř skály 10 °C
- koeficient přestupu tepla  $\alpha$  – 10 m/m<sup>2</sup>/K
- $t_1$  – teplota vzduchu 10 °C
- $t'_1$  – teplota povrchu skály

Tepelný tok na povrchu skály pak vycházel ze vzorce:

$$q = \alpha \cdot (t_1 - t'_1)$$

Z druhé části pokusu byly získány zkušenosti, že je třeba lépe zajistit odvod tepla do horniny. Není nutné používat topidlo o tak vysokém výkonu. Termočlánky zde použité by měly být v zaizolovaném provedení. Takové mají sice horší odezvu, to je ale při tomto experimentu irelevantní. Geopolymer je potřeba nechat zaschnout déle.

Celkově vzato aplikace METEH splnila všechna očekávání a fungovala dle našich nároků. Měřicímu řetězci je možno vytknout čidla, která by byla vhodnější v elektricky netečné, tedy zaizolované, podobě. Také by bylo dobré použít modul s více kanály, aby bylo možno připojit i termočlánek instalovaný v topné patroně. Nejproblematictější se ukázalo topidlo. Tyto patrony jsou určeny pro aplikaci do přesně vysoustružených otvorů v kovu, kde je zajištěn nesrovnatelně lepší odvod tepla. Při vkládání do horniny jim hrozí rychlé přehřátí a poškození.

## Závěr

Pro tuto bakalářskou práci byly zhodnoceny možnosti kontaktního měření teploty hornin. Bylo konstatováno, že v úvahu přicházejí tři typy čidel – odporové teploměry, termistory a termočlánky a byly popsány jejich výhody a nevýhody. Vzhledem k dostupnosti byla zvolena metoda měření za pomoci termočlánků a příslušného měřicího modulu od National Instruments typ NI 9211. Tím byl navržen měřicí řetězec.

V programovacím prostředí Labview byla vytvořena měřicí aplikace METEH. K její tvorbě bylo použito programovacích postupů jako stavový automat a fronta. Aplikace dovoluje měřit teplotu termočlánky prostřednictvím měřicích modulů National Instruments. V možnostech se nacházejí volby pro změnu typu a počtu termočlánků, měřicích jednotek, vzorkovací frekvence či nastavení ukládání měřených dat do souboru. Vyčítaná data jsou zobrazována na grafu.

Měřicí řetězec i aplikace METEH byly otestovány v praxi ve výukovém podzemním středisku Josef. Účelem bylo zhodnocení vhodnosti tohoto řešení a také výzkum tepelných vlastností horniny a geopolymery. Lze konstatovat, že zatímco aplikace a měřicí modul splnily očekávání, při samotné realizaci experimentu nastaly nepředvídané problémy. Z důvodu časové tísně nedošlo k ustálení teploty v okolí tepelné patrony, použité k ohřevu horniny, a druhý experiment s geopolymery zcela selhal kvůli technické závadě na tepelné patroně. Slabým článkem celého experimentu bylo tedy jednoznačně topidlo.

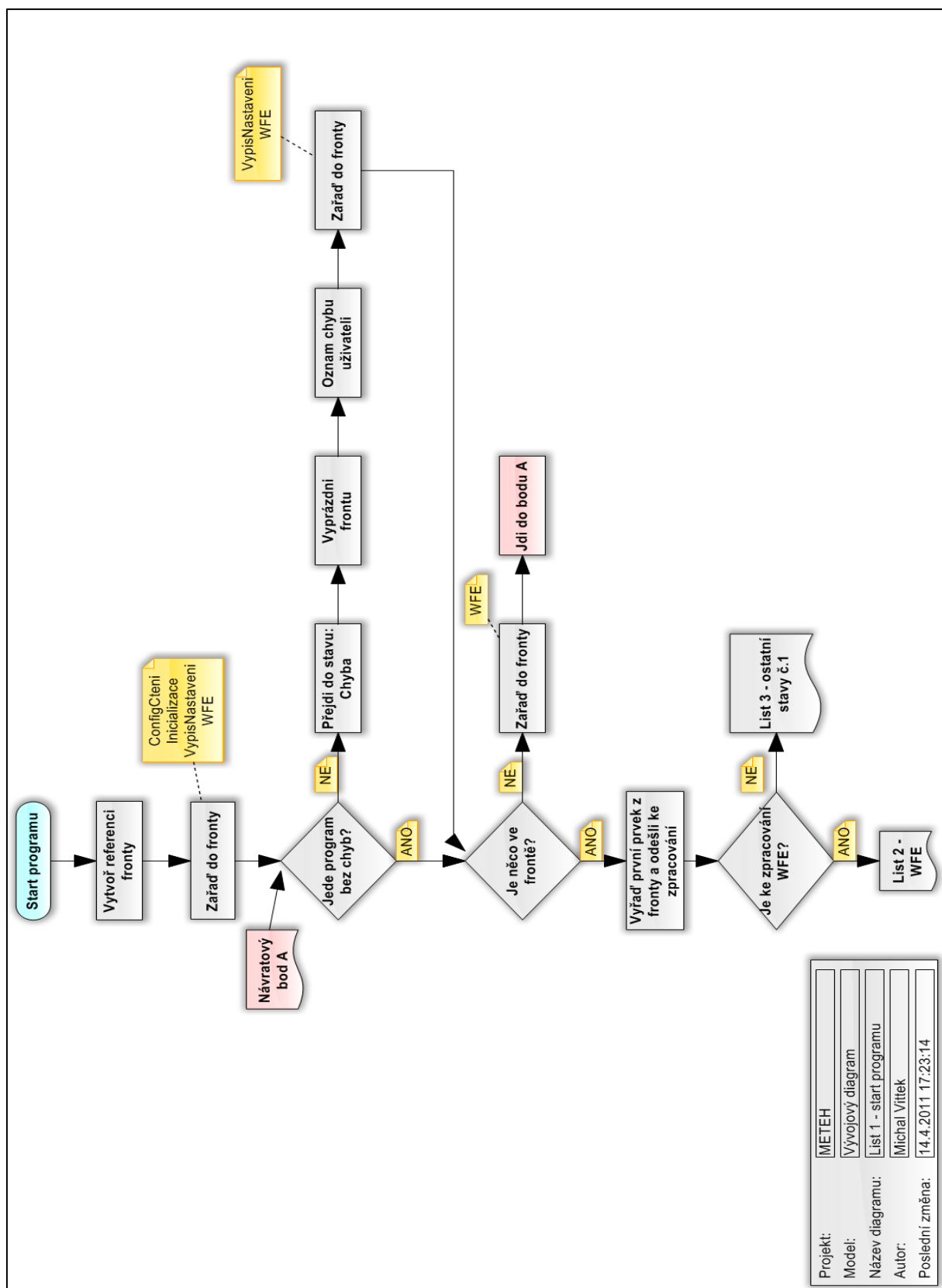
Přesto bylo dosaženo některých zajímavých výsledků zasluhujících další výzkum. Jednak to jsou drobné skokové změny v průběhu teploty na prvním čidle, a navíc určitý rozpor v naměřené teplotě horniny oproti počítačové simulaci. Bylo také dosaženo praktických zkušeností jak postupovat a čemu se naopak vyhnout při příštích pokusech podobného zaměření. Je vhodné užívat zaizolovaných čidel, a doba trvání experimentu musí být delší, aby došlo k ustálení teploty. Při dalších příležitostech je také třeba věnovat patřičnou pozornost odvodu tepla z tepelné patrony do horniny, aby nedošlo ke znehodnocení topidla, případně použít model se slabším výkonem. Geopolymer vyžaduje v podmínkách panujících v podzemí delší dobu k zatvrdnutí – alespoň dva týdny.

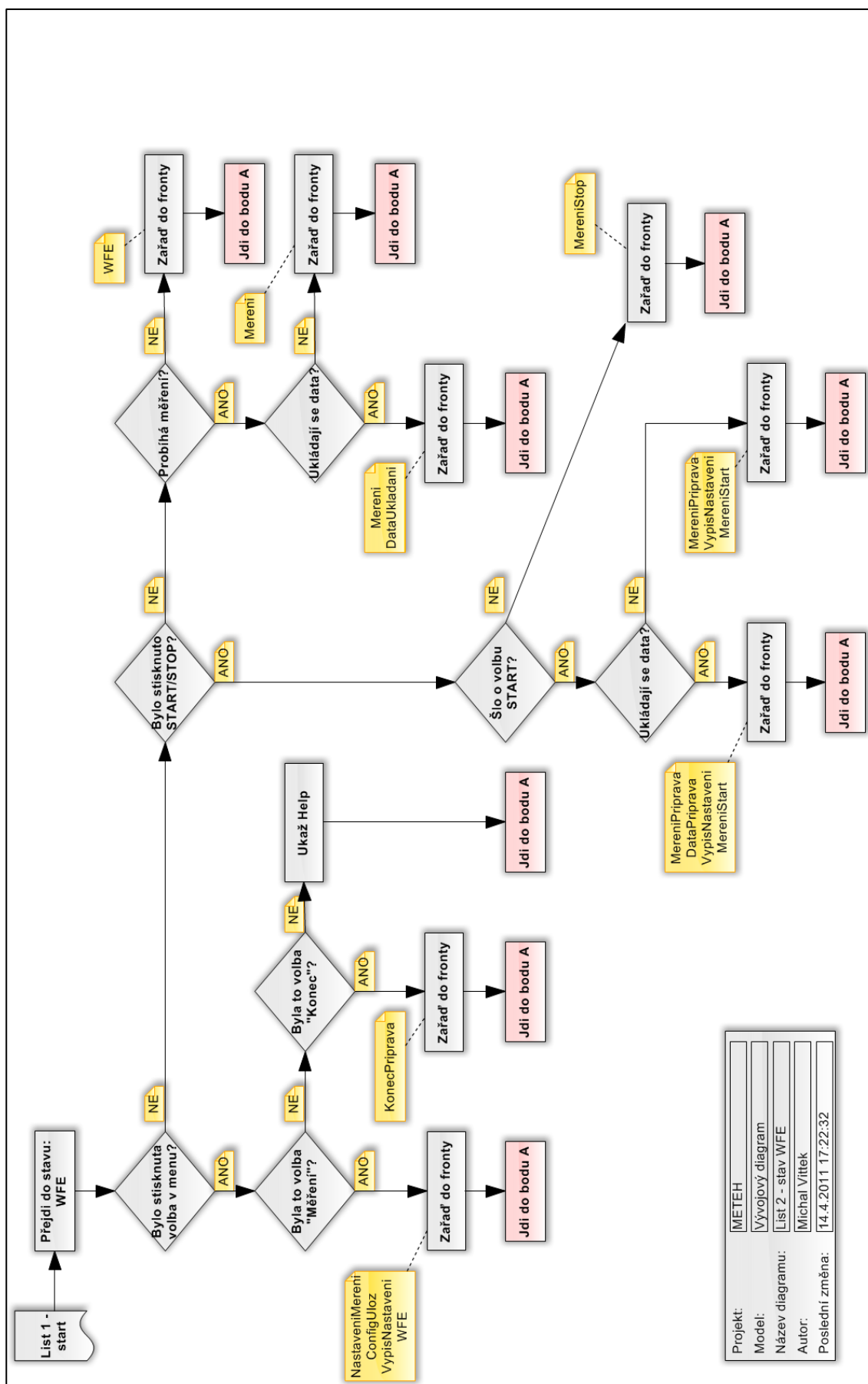
Na tuto bakalářskou práci by měly navazovat další experimentální práce, které využijí získaných poznatků, zkušeností, a vyvinutého software a dokončí zdárně praktickou část včetně experimentu s geopolymery. Také existuje reálný předpoklad, že vytvořený měřicí řetězec či aplikace poslouží jako měřicí úloha pro studenty, přičemž dojde k jejich doplnění o dálkově ovládané prvky, aby úloha mohla být spouštěna přímo z laboratoře na univerzitě přes internet.

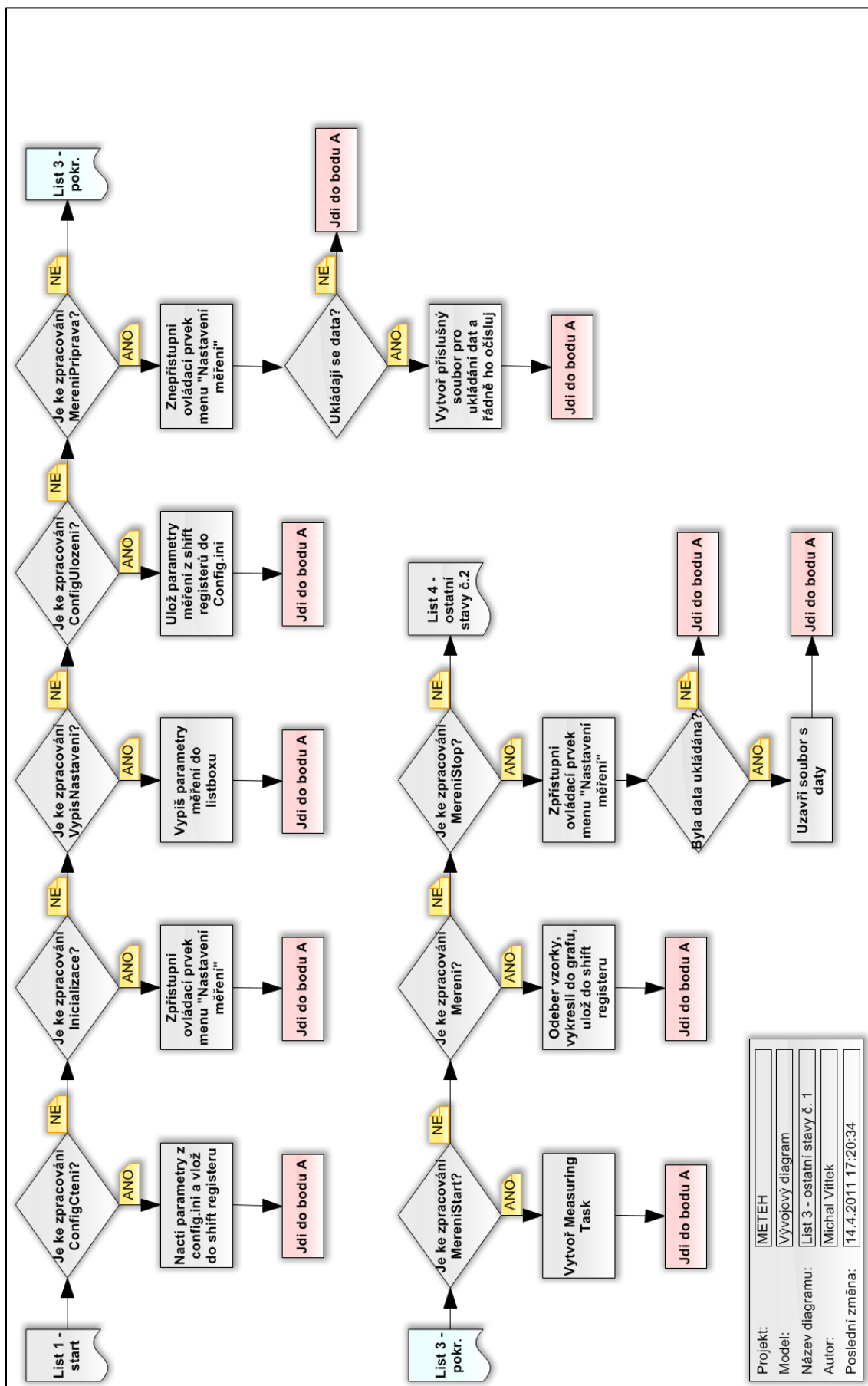
## Seznam literatury

- [1] KREIDL, Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. BEN-technická literatura. Praha: Nakladatelství BEN, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] Omega – Odporové teploměry. <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/RTD.html>
- [3] National Instruments. Začínáme s Labview 2. 2006, elektronický formát – pdf. <http://www.ni.com/czech>
- [4] National Instruments. Measurement Multithreading in NI-DAQ 7. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4525>
- [5] National Instruments. Scientific Computing with NI LabVIEW. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7662>
- [6] BILČÁK, Marek. *Možnosti použití geopolymérů pro stabilizaci odpadů*. Bakalářská práce. Elektronický formát. Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [7] Builder.cz - Datové typy enum a union. [http://www.builder.cz/art/cpp/cpp\\_enum.html](http://www.builder.cz/art/cpp/cpp_enum.html)

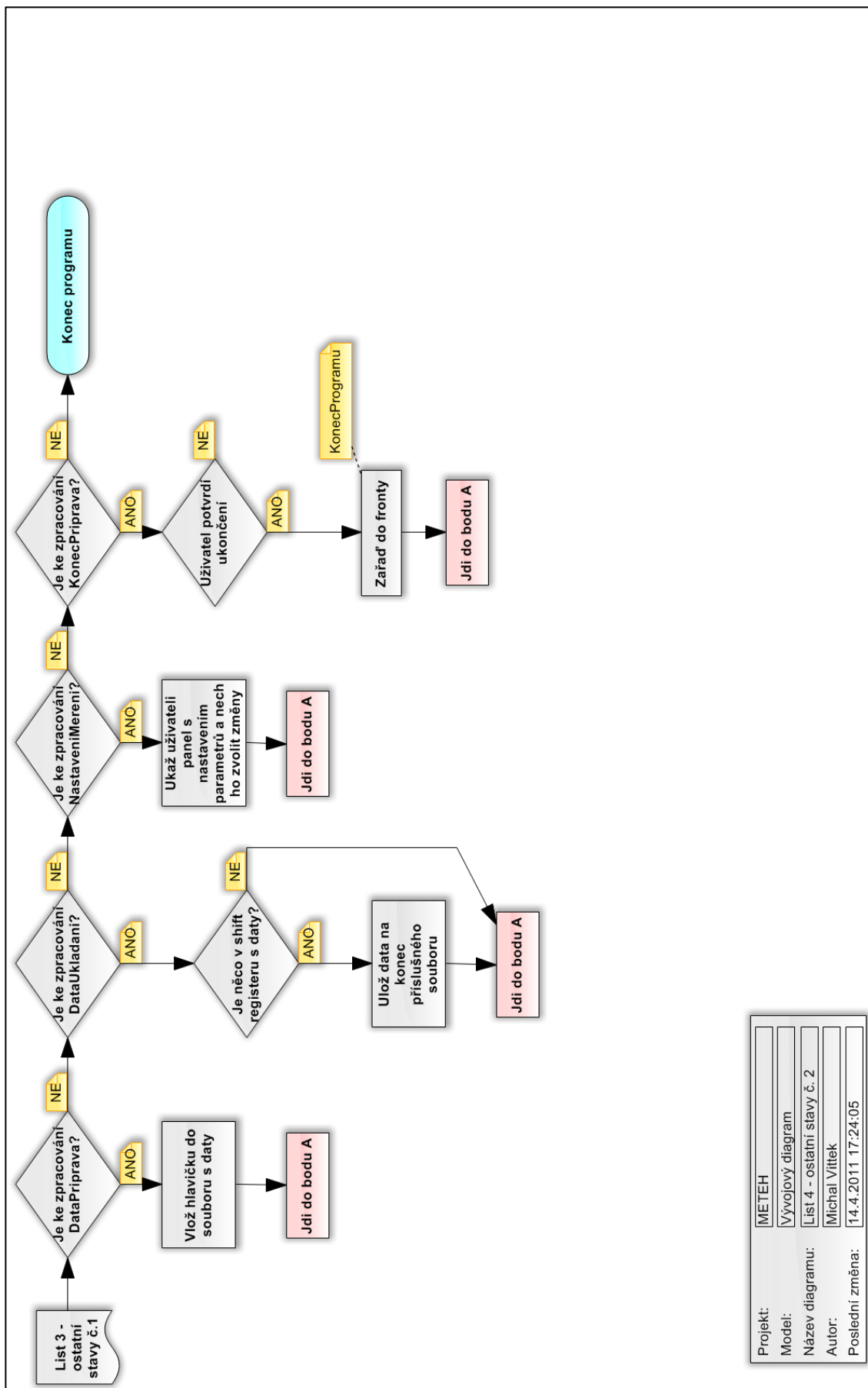
## Příloha A - vývojový diagram





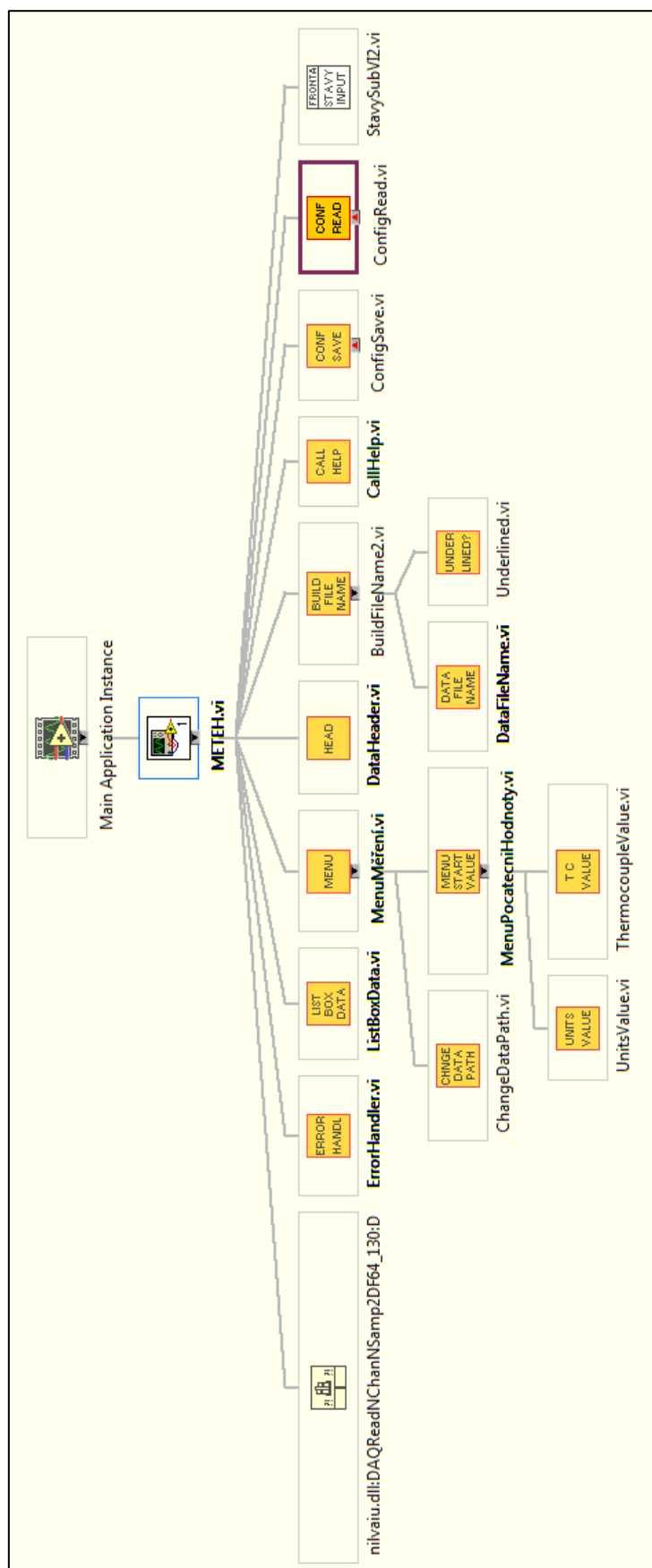






Projekt:	METEH
Model:	Vývojový diagram
Název diagramu:	List 4 - ostatní stavy č. 2
Autor:	Michal Víttek
Poslední změna:	14.4.2011 17:24:05

## Příloha B – hierarchie VI



## Příloha C - VI a subVI použité v aplikaci

Hlavní VI, které je spuštěno při startu programu, se jmenuje METEH.vi. Obsahuje ve svém blokovém diagramu vše ostatní, včetně dalších subVI. Grafické znázornění hierarchie je uvedeno v příloze B.

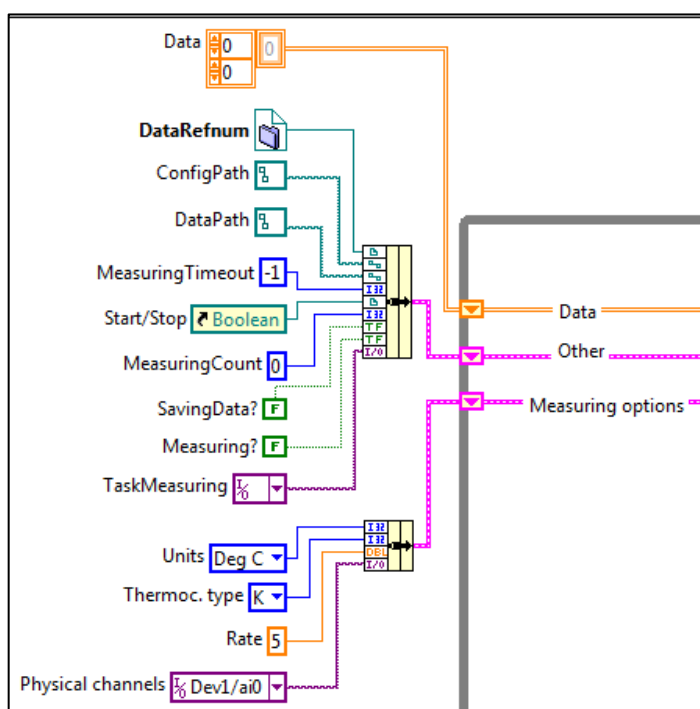
- BuildFileName2.vi – nachází se ve stavu MereniPriprava. Kontroluje správnost cesty k datovému souboru a nastavuje příslušnou číselnou koncovku. Obsahuje další subVI:
  - Underlined.vi - z cesty (path) je vyjmuto jméno souboru, otestováno zda je ve správném formátu a rozděleno před podtržítkem
  - DataFileName.vi - Pokud je jméno souboru bez čísla \_xxx, je mu přiřazeno číselné pořadí. Poté je otestováno zda, již takové pořadí neexistuje, v kladném případě je inkrementováno, dokud není jméno souboru unikátní
- ConfigRead.vi - načítá nastavení z konfiguračního souboru. Cestu k němu zjišťuje v závislosti na tom, zda je aplikace otevřena v labview nebo jako .exe soubor. Nachází se ve stavu ConfigCteni
- ConfigSave.vi – ukládá nastavení z shift registrů do konfiguračního souboru. Nachází se ve stavu ConfigUlozeni
- CallHelp.vi - dynamicky volá subVI Help.vi aby bylo možno pokračovat v běhu programu i při prochítání nápovědy. Nachází se ve stavu WFE
- Help.vi – nenachází se v žádném blokovém diagramu programu, ale je dynamicky voláno pomocí CallHelp.vi. Zobrazí uživateli nápovědu
- DataHeader.vi - na začátek nového souboru pro ukládání dat je vložena hlavička s datem, časem, měřícími parametry atd. Nachází se ve stavu DataPriprava
- MenuMěření.vi - v tomto subVI proběhne otevření okna pro nastavení parametrů měření a jejich zápis do shift registrů. Nachází se ve stavu NastaveniMereni. Obsahuje také:
  - ChangeDataPath.vi - nastavení cesty a názvu souboru s daty
  - MenuPocatecniHodnoty.vi - nastavení počátečních hodnot ovládacích prvků v menu na hodnoty vyčtené ze shift registrů. Toto subVI opět obsahuje další dvě:
    - UnitsValue.vi – slouží k nastavení typu jednotek pro ovladač v menu
    - ThermocoupleValue.vi – slouží k nastavení typu termočlánku pro ovladač v menu

- ListBoxData.vi - příprava parametrů měření pro výpis v listboxu. Nachází se ve stavu VypisNastaveni
- ErrorHandler.vi - dojde k zobrazení dialogového okna s popisem chyby pro uživatele. Nachází se ve stavu Chyba
- StavySubVI2.vi – postupně přidává elementy pole stavů do fronty. Nachází se na samém začátku programu ještě před vstupem do hlavní While smyčky

## Příloha D - shift registry programu

V programu je použita řada shift registrů, za zmínku však stojí tři nejdůležitější, procházející hlavní While i Case strukturou.

- Data – zde se ukládají naměřené vzorky z měřicí karty kvůli ukládání do datového souboru
- Measuring options – slouží k uložení parametrů měření především pro potřeby tvorby measuring task. Jednotky, typ termočláunku, vzorkovací frekvence a fyzické kanály
- Other – obsahuje všechny ostatní proměnné a příznaky, jako například cestu k datovému souboru, zda jsou ukládána data či zda probíhá měření



Obr 6.1: Vstup shift registrů do hlavní smyčky While